



Institute of Chemical Technologies  
and Analytics



# Nasse Deposition in Tirol im Zeitraum Oktober 2015 – September 2016

Bericht erstellt von

Julia Firmkranz und Anne Kasper-Giebl

Institut für Chemische Technologien und Analytik, TU Wien

Georg Lair und Walter Egger

Abteilung Waldschutz, Amt der Tiroler Landesregierung

Wien, Innsbruck 2017

## Inhalt

Zusammenfassung.....	3
<b>1. Hintergrund und Ziel der Studie .....</b>	<b>4</b>
<b>2. Probenahme, Analysen und Auswertung der nassen Deposition .....</b>	<b>6</b>
2.1. Beschreibung des Probenahmegerätes.....	6
2.2. Beschreibung der aktuellen Messstationen in Tirol.....	7
2.3. Chemische Analysen der Niederschlagswässer und Auswertung der Ergebnisse .....	10
<b>3. Ergebnisse und Diskussion.....</b>	<b>11</b>
3.1. Konzentrations- und Depositionsergebnisse für das Untersuchungsjahr .....	
Oktober 2015 bis September 2016 .....	11
3.2. Veränderung der Konzentrations- und Depositionswerte im Jahresverlauf .....	13
3.3. Entwicklung der jährlichen Konzentrations- und Depositionswerte seit .....	
Beginn der Messungen.....	23
3.4. Vergleich der Tiroler Messstellen mit Ergebnissen aus den anderen Bundesländern ....	34
3.5. Zusammenhang zwischen den Niederschlagsmengen und den .....	
Stoffkonzentrationen bzw. Stoffeinträgen .....	43
<b>4. Schlussfolgerungen .....</b>	<b>49</b>
<b>5. Literatur.....</b>	<b>50</b>

### *Bericht CTA-EAC-01/17*

*Im Auftrag der Tiroler Landesregierung, Abteilung Waldschutz, Bürgerstraße 36, A-6020 Innsbruck  
Institut für Chemische Technologien und Analytik, TU Wien, Getreidemarkt 9/164-UPA, A - 1060 Wien*

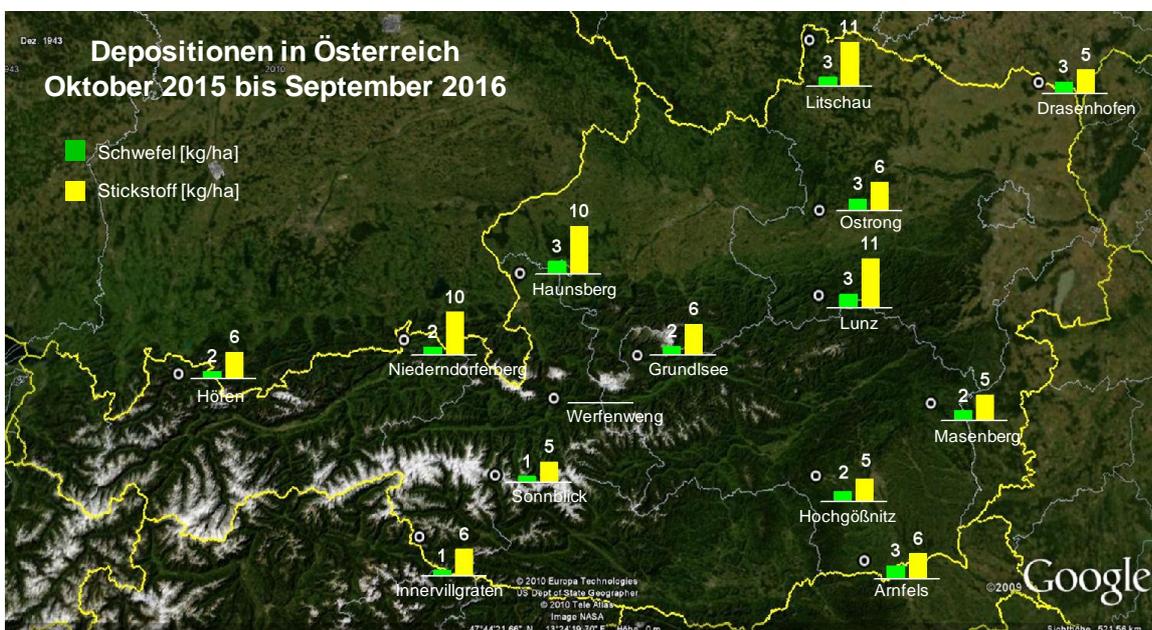
## Zusammenfassung

Zwischen dem 1.10.2015 und 30.09.2016 wurden an den drei Tiroler Messstellen in Höfen (Bezirk Reutte), Niederndorferberg (Bezirk Kufstein) und Innervillgraten (Bezirk Lienz) die täglichen Niederschlagsmengen gesammelt. Im Labor wurden der pH-Wert, die elektrische Leitfähigkeit und der Ionengehalt ( $\text{NH}_4^+$ -,  $\text{Na}^+$ -,  $\text{K}^+$ -,  $\text{Ca}^{2+}$ -,  $\text{Mg}^{2+}$ -,  $\text{Cl}^-$ -,  $\text{NO}_3^-$ - und  $\text{SO}_4^{2-}$ -Konzentrationen) der Niederschlagswässer bestimmt. Insgesamt wurden 371 Niederschlagsproben analysiert (142 aus Höfen, 118 aus Innervillgraten, 111 aus Niederndorferberg). Im November 2015 wurde in Höfen und im Dezember 2015 wurde in Innervillgraten kein Niederschlag verzeichnet.

Die täglichen Niederschlagsmengen streuten sehr stark. Ebenso variierten auch die Konzentrationswerte der täglichen Niederschlagsproben. Hohe Ionenkonzentrationen wie auch hohe Niederschlagsmengen waren selten. Allgemein hatten einzelne ergiebige Niederschlagsereignisse einen großen Anteil am gesamten Ioneneintrag. Betrachtet man nur die Tage mit Niederschlagsmengen über 16 mm (das sind je nach Station zwischen 7% und 24 % aller Niederschlagstage), so bewirkten diese bereits 26% bis 54% der gesamten Niederschlagseinträge. Der Eintrag durch nasse Deposition erfolgte dementsprechend im Jahresverlauf schubweise.

Die Auswertungen der Messdaten ergaben Einträge über die nasse Deposition von **1,5 - 1,8 kg S/ha/a** und **6,1 - 10 kg N/ha/a** an den Messstellen in Nordtirol, während in Innervillgraten (Osttirol) etwas geringere Einträge von **1,3 kg S/ha/a** und **5,8 kg N/ha/a** festgestellt wurden. Damit wird in Tirol für Schwefel keine Überschreitung der kritischen Belastungsgrenze von Ökosystemen (= 3 kg Schwefeleintrag/ha/a gemäß dem „Critical Load“- Konzept; WHO, 1995) registriert. Stickstoffeinträge über 10 kg/ha/a werden von der WHO (1995) als deutliche Belastung eingestuft, die zu negativen Veränderungen in nährstoffarmen Ökosystemen führen. Berücksichtigt man, dass der Gesamteintrag nicht nur mit dem Niederschlag erfolgt, sondern auch über die trockene Deposition und den Nebel, so ist hier eine weitere Beobachtung der Stickstoffeinträge in die Umwelt von großer Bedeutung.

Ein Vergleich der Tiroler Messstellen mit jenen in ganz Österreich zeigt (vgl. Abbildung 1), dass die Ionenkonzentrationen im Westen Österreichs tendenziell geringer sind als in den östlichen Bundesländern. Auch sind die Konzentrationswerte im inneralpinen Raum geringer als nördlich und östlich der Alpen, wobei in den hochalpinen Lagen aufgrund höherer Niederschlagssummen auch ökologisch relevante Ionenmengen deponiert werden.



**Abbildung 1:** Vergleich der Schwefel- und Stickstoffdepositionen in Österreich; \*In Werfenweng liegt im Untersuchungszeitraum keine vollständige Messreihe für die Ermittlung der Jahresdeposition vor.

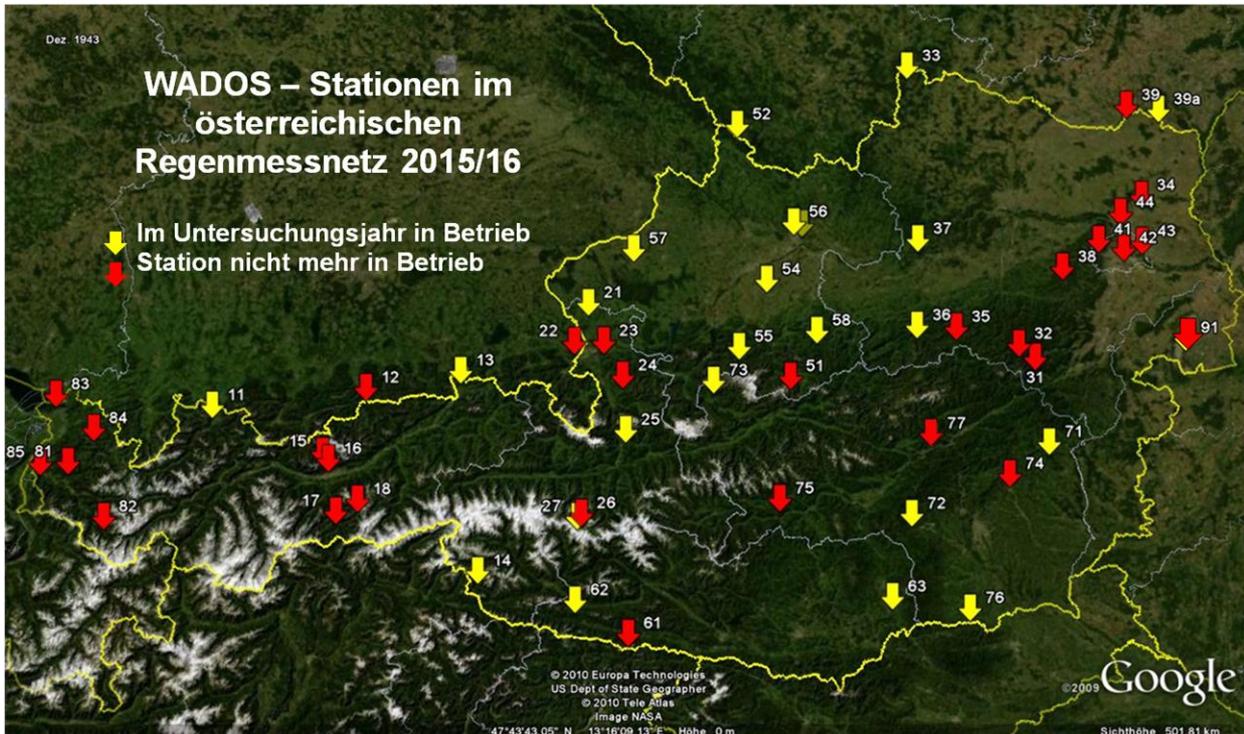
## 1. Hintergrund und Ziel der Studie

In den 1970er Jahren traten in Mitteleuropa großflächig neuartige Waldschäden, meist unabhängig von Klima, Standort und waldbaulichen Praktiken, auf. Die Schäden an Bäumen umfassten zum einen eine Auflichtung des Kronenbereichs aufgrund vorzeitigen Blattfalls, kleinere und weniger Blattoorgane wie auch Verzweigungsanomalien. Zum anderen zeigten sich auch Schädigungen am Wurzelsystem durch ein starkes Absterben von Feinwurzeln, geringe Reproduktionsfähigkeiten und verminderte Mykorrhizierung. Als Verursacher für dieses sogenannte „Waldsterben“ wurde die komplexe Wirkung verschiedener Luftschadstoffe erkannt, welche über große Distanzen transportiert werden können und vor allem in Form von nasser Deposition (bekannt als „Saurer Regen“) in die Ökosysteme eingetragen werden. Weitere Phänomene dieses grenzüberschreitenden Eintrags atmosphärischer Spurenstoffe waren die Abnahme des pH-Wertes, die Mobilisierung toxischer Kationen in Böden und aquatischen Systemen, aber auch die Eutrophierung und die strukturelle Verarmung terrestrischer Ökosysteme. Als Konsequenz wurden in Tirol, wie auch in anderen Bundesländern, an mehreren Standorten Messstationen zur Quantifizierung der Schadstoffeinträge über die nasse Deposition errichtet (Tabelle 1). In den späten 1980er- und in den 1990er-Jahren konnte aufgrund von Luftreinhaltegesetzen, den zwingenden Einbau von Rauchgasentschwefelungsanlagen in Kraftwerken und durch die Abschaltung einiger Braunkohlekraftwerke, auch in der ehemaligen DDR und CSSR, eine kontinuierliche Abnahme der Schwefeleinträge beobachtet werden. In Tirol wurde die Anzahl der Messstandorte für die nasse Deposition in den späten 1980er Jahren sukzessive dezimiert, sodass ab dem Jahr 1990 nur mehr jene drei Stationen mit den damals höchsten Schadstoffeinträgen weiter erhalten wurden. Diese drei Stationen werden auch heute noch im Sinne des Langzeitmonitorings und zur aktuellen Überwachung der nassen Deposition betrieben. Zwei Standorte befinden sich am Alpennordrand in Höfen/Bezirk Reutte (bis Oktober 2015 in Wängle/Bezirk Reutte) und Niederndorferberg/Bezirk Kufstein und eine Station südlich des Alpenhauptkamms in Innervillgraten/Bezirk Lienz.

**Tabelle 1:** Ehemalige und aktuelle(\*) Messstandorte in Tirol zur Bestimmung der nassen Deposition.

<b>Ort</b>	<b>Messstellenbezeichnung</b> (interne Kennnummer der Abt. Waldschutz, Land Tirol)	<b>Messungszeitraum</b>
Innsbruck	Seegrube (2123)	Dezember 1985 – März 1988
Innsbruck	Gramartboden (2131)	Dezember 1985 – März 1988
Innsbruck	Reichenau (2135)	Dezember 1985 – März 1988
Nößlach	Kalkschmied (2214)	Dezember 1984 – September 1986
Schmirn	Obern (2219)	Oktober 1985 – September 1986
<b>Niederndorferberg*</b>	Niederndorferberg (2526)	November 1983 - dato
Reutte	Wängle (2701)	November 1983 – 18.10.2015
<b>Höfen*</b>	Schiliftweg 3 (2711)	01.12.2015 - dato
Achenkirch	Ampelsbacherhof (2810)	Oktober 1983 – Juni 1989
<b>Innervillgraten*</b>	Innervillgraten 27 (2903)	August 1984 - dato

Derzeit sind in Österreich 20 Messstellen in Betrieb, die von den jeweiligen für Umwelt- bzw. Immissionsschutz zuständigen Landesbehörden betrieben werden. Nähere Angaben zu diesen, sowie den in der Vergangenheit betriebenen Messpunkten befinden sich im Anhang. Die Abbildung 2 zeigt die Lage der einzelnen Stationen. Die Zahlen beziehen sich auf die Stationskennungen, die auch in den Tabellen im Datenanhang angegeben sind (Tabelle A 18 und Tabelle A 19).



**Abbildung 2:** Lage der ehemaligen und aktuellen Messtationen zur Bestimmung der nassen Deposition von Luftschadstoffen im österreichischen Niederschlagsmessnetz im Untersuchungsjahr 2015/2016.

Die Niederschlagsmessungen dienen der Erfassung der zeitlichen und räumlichen Trends der Stoffeinträge von Schwefel und Stickstoffverbindungen, freier Säure sowie von neutralisierenden Kationen. Die Bestimmung des Stoffeintrags durch die nasse Deposition ist für die Abschätzung des Zustands und der zukünftigen Entwicklung von Ökosystemen gemäß dem "Critical Load"-Konzept von Bedeutung. Seit den ersten Arbeiten zur Darstellung der Umweltprobleme durch den Stoffeintrag von z.B. Schwefel- und Stickstoffverbindungen (Granat 1978) liegen nun Zeitreihen von etwa 40 Jahren vor, die für Europa beispielsweise von Torseth et al. (2012) dargestellt werden. Eine globale Bewertung des Stoffeintrags und der Niederschlagschemie im Zeitraum 2000 bis 2007, mit einem Vergleich von Messungen und Modellrechnungen, erfolgte in der Arbeit von Vet et al. (2014). Auch für Österreich werden Zeitreihen zum Stoffeintrag in der Literatur beschrieben (Tsakovski et al. 2000, Greilinger et al. 2016).

Im vorliegenden Bericht werden nun die Messergebnisse der nassen Deposition in Tirol von Oktober 2015 bis September 2016 zusammengefasst und erläutert. Neben der Darstellung der Jahreseinträge wird die zeitliche Variabilität der Einträge einerseits anhand der Monatsmittel und andererseits über ihr Langzeitverhalten (z.B. Trends seit Beginn der Messungen) mit Schwergewicht auf die Hauptkomponenten (S- und N-Verbindungen) dargestellt. Ein Überblick über die Messergebnisse im österreichischen WADOS-Messnetz sowie der Zusammenhang zwischen Regenmenge und Stoffkonzentrationen sollen weitere Grundinformationen über die nasse Deposition in Tirol und Österreich für die Leserin und den Leser liefern.

## 2. Probenahme, Analysen und Auswertung der nassen Deposition

### 2.1. Beschreibung des Probenahmeegerätes

Der WADOS (**W**et **A**nd **D**ry **O**nly **P**recipitation **S**ampler) ist ein Probenahmeegerät, das die getrennte Sammlung von nasser und trockener Deposition ermöglicht. Unter „nasser Deposition“ versteht man den Eintrag durch Niederschlagsereignisse in Form von Regen oder Schnee, während unter „trockener Deposition“ der direkte Eintrag von Staub oder gasförmigen Luftinhaltsstoffen verstanden wird. In Österreich wird der WADOS nur zur Probenahme der nassen Deposition verwendet. Abbildung 3 zeigt ein Photo des WADOS. Auf der linken Seite des Bildes befindet sich der Auffangbehälter für die nasse Deposition, der mit einem Deckel verschlossen ist. Im rechten Bildteil ist im Hintergrund der schwarze Niederschlagssensor zu sehen. Davor befindet sich der Auffangbehälter für die trockene Deposition. Sobald der Regensensor einen Niederschlag meldet, wird der Auffangbehälter für die nasse Deposition geöffnet und der Deckel über das Sammelgefäß für die trockene Deposition bewegt. Regen oder Schnee werden somit gesammelt, und die Niederschlagsprobe rinnt durch einen Trichter in eine unten angeschraubte Probenflasche. Um zu verhindern, dass eine grobe Verschmutzung in die Probeflasche gelangt, ist ein auswechselbares Sieb eingebaut. Die Probenflasche selbst ist durch das verlängerte Mantelrohr vor Strahlung geschützt. Das Wechseln der Probenflasche geschieht durch einfaches Ab- und Aufschrauben der Reserve-Probeflasche täglich zwischen 7 und 8 Uhr morgens. Der Messstellenbetreuer misst dabei den gesammelten Niederschlag und transferiert eine Teilprobe (ca. 50 ml) in ein wesentlich kleineres Probenfläschchen. Dadurch wird das Sammeln, Aufbewahren (gekühlt und im Dunkeln) und der Transport der Proben für eine spätere chemische Analyse erleichtert.



**Abbildung 3:** WADOS der Firma Kroneis GmbH (Messtechnik für die Umwelt-Meteorologie A-1190 Wien, Iglaseegasse 30-32). Links befindet sich die Vorrichtung zur Messung der nassen Deposition, rechts der Auffangbehälter für die trockene Deposition. Der Deckel wird je nach Witterung über die Vorrichtungen geschwenkt.

Der WADOS ist standardmäßig mit einer Heizung inklusive Thermostat ausgerüstet. Der Schnee, der vom Sammelgefäß aufgefangen wird, schmilzt im Inneren und tropft in die untere Probenflasche, wo er wieder gefrieren kann. Die Heizwicklung ist im unteren Drittel an der Außenwand des Auffanggefäßes angebracht. Dies hat zur Folge, dass der Schnee, der im oberen Bereich aufgefangen wird, nicht sofort abgeschmolzen wird. Erst wenn der Deckel wieder geschlossen wird, schmilzt der Schnee ab. Damit können Verdunstungsverluste vermieden werden. Die Temperatur zwischen 8 und 10 °C wird durch ein Thermostat im Sammelgefäß gehalten.

Ist der Niederschlag zu Ende, dann trocknen die Tropfen auf der Regensensoroberfläche durch eine erhöhte Heizstufe (Oberflächentemperatur ca. 50°C) relativ rasch ab. Nach einer Schaltverzögerung von ca. 5 Minuten geht der Deckel wieder auf das Sammelgefäß für nasse Deposition zurück. Die Sensoroberfläche wird jetzt nur mehr auf ca. 20°C gehalten, damit Nebel und Taubildung keine Regenmeldung auslösen. Ein direkter Vergleich zwischen den Regenmengen im WADOS und in einem Ombrometer (Messstelle Höfen, Untersuchungs-jahr 2016), der von der Abteilung Waldschutz durchgeführt wurde, ergab eine um ca. 10% verringerte Regenmenge durch das Funktionsprinzip des WADOS-Messgeräts. Eine Datenauswertung ergab zudem, dass Regenmengen unter 0,3 mm/Tag aufgrund des

verspäteten Öffnungsmechanismus und der Benetzungsverluste im WADOS nicht mehr erfasst werden.

Die Probenahme der trockenen Deposition kann durch Austausch des dafür vorgesehenen Sammelgefäßes mit einem Ersatzgefäß erfolgen. In Tirol wird auf die Bestimmung der Einträge über die trockene Deposition mit dem WADOS verzichtet.

## 2.2. Beschreibung der aktuellen Messstationen in Tirol

Stationsbezeichnung:  
**Höfen**

Gemeindekennziffer:  
70816

Stationsnummer:  
2711

Anschrift der Station:  
6600 Höfen, Schilliftweg 3

Bezirk:  
Reutte

Seehöhe der Station:  
874 m

Geographische Länge (WGS84):  
10° 40' 50,95" E

Geographische Breite (WGS84):  
47° 28' 15,21" N

Topographie, Lage der Station:  
Tal- und Beckenlage

Geologie:

Nördliche Kalkalpen. Im Bereich der Messstation liegen rigide Gesteine der Lechtaldecke wie Muschelkalk und Wettersteinkalk auf weichen, tonreichen Gesteinen der Allgäudecke wie Fleckenmergel und Kalkmergel (Röhring, 1997).

Klima:

Das Becken von Reutte gehört nach Walter und Lieth (1960) der Klimazone VI (X)3 mit temperiertem, im Gebirge kühlem, humidem Klima mit ausgeprägter kalter Jahreszeit und großen Schneemengen an. Die meisten Niederschläge fallen während der Vegetationszeit. Der durchschnittliche Jahresniederschlag beträgt auf 869 m Meereshöhe 1457 mm, und die Jahresmitteltemperatur liegt bei 6,9 °C (Tirol Atlas, 2017). In Höhen um 1500 m steigt die Niederschlagsmenge auf ca. 1600 bis 1800 mm an.

Boden:

Rendzinen, Braunlehme

Nutzung der Umgebung:

Ländliches Wohngebiet, Grünland (im Winter Schipiste)

Station besteht seit:

01.12.2015 - dato

Anmerkung:

Übersiedelung der Station Wängle/Reutte (Nov/83 bis 18.10.2015) nach Höfen im Herbst 2015.



**Abbildung 4:** WADOS am Standort Höfen/Bezirk Reutte mit Wetterstation des hydrographischen Dienstes Tirol.

Stationsbezeichnung:  
**Niederndorferberg**

Gemeindekennziffer:  
70519

Stationsnummer:  
2526

Anschrift der Station:  
6342 Niederndorferberg, Eiberg 7b

Bezirk:  
Kufstein

Seehöhe der Station:  
697 m

Geographische Länge (WGS84):  
12° 13' 36,65" E

Geographische Breite (WGS84):  
47° 39' 43,60" N

Topographie, Lage der Station:  
Hanglage

Geologie:

Nördliche Kalkalpen. Die Gemeinde Niederndorferberg erstreckt sich über sanft hügelige Strukturen im Bereich der Bayrischen Voralpen über Höhenlagen zwischen ca. 550 m und knapp über 1000 m Seehöhe. Geologisch gesehen liegt der größte Teil des Gemeindegebietes über Fleckenmergeln und Kalken, daneben spielen auch die Kössener Schichten eine große Rolle. Kleinräumig treten dann noch Aptychenkalke, sowie Terrassensedimente und Gletschermoränen auf (Geologische Bundesanstalt, 2007).

Klima:

Die Gemeinde Niederndorferberg liegt nach Walter und Lieth (1960) in der Klimazone VI(X) mit temperiertem, im Gebirge kühlem, humidem Klima mit ausgeprägter kalter Jahreszeit und großen Schneemengen. Die meisten Niederschläge fallen während der Vegetationszeit (Tirol Atlas, 2017).

Boden:

Rendzinen, Braunlehme

Nutzung der Umgebung:

Ländliches Wohngebiet, Grünland

Station besteht seit:

November 1983 - dato



**Abbildung 5:** WADOS am Standort Niederndorferberg/ Bezirk Kufstein.

Stationsbezeichnung:  
**Innervillgraten**

Gemeidekennziffer:  
70710

Stationsnummer:  
2903

Anschrift der Station:  
9932 Innervillgraten Nr. 27

Bezirk:  
Lienz

Seehöhe der Station:  
1729 m

Geographische Länge (WGS84):  
12° 21' 06,14" E

Geographische Breite (WGS84):  
46° 49' 04,74" N

Topographie, Lage der Station:  
Hanglage

**Geologie:**

Der größte Teil der Gemeinde liegt auf dem Altkristallin (Alte Gneise). Das Altkristallin wird in seinem Südabschnitt durch die Dominanz von Paragneisen, z.T. auch Marmore, v.a. bei Kalkstein, Glimmerschiefer, Amphibolite und Eklogite charakterisiert. Unmittelbar am Villgratenbach befinden sich vor allem Schwemm- bzw. Murenkegel und undifferenzierte Moränen (Geologische Bundesanstalt, 2006).

**Klima:**

Das Villgratental gehört, wie alle anderen größeren Täler und Seitentäler in Osttirol (mit Ausnahme des Tiroler Gailtales) zur temperierten Zwischenalpenzone (VI4). Die Winter sind zwar ausgeprägt, dauern jedoch nicht sehr lange. Die Jahresniederschläge liegen um ca. 1.100 mm, wobei im Sommer mittlere und im Winter mäßige Niederschlagsmengen zu erwarten sind (Walter und Lieth, 1960). Für Innervillgraten auf 1400 m Meereshöhe wurde für die Periode 1980-2000 ein mittlerer Jahresniederschlag von ca. 1000 mm und eine mittlere Jahrestemperatur von 3,6 °C gemessen (Tirol Atlas, 2017). Die meisten Niederschläge wurden für diese Periode im Juni und Juli verzeichnet, die geringsten im Jänner und Februar.

**Boden:**

Ranker, Braunerden

**Nutzung der Umgebung:**

Ländliches Wohngebiet, Grünland

**Station besteht seit:**

August 1984 – dato



**Abbildung 6:** WADOS am Standort Innervillgraten/Bezirk Lienz.

### 2.3. Chemische Analysen der Niederschlagswässer und Auswertung der Ergebnisse

Im Analysenlabor des Landes Tirol (Sachgebiet Chemische Technische Umweltschutzanstalt) werden der pH-Wert (Maß für die Acidität), die elektrische Leitfähigkeit und die anorganischen Ionen Chlorid, Nitrat und Sulfat sowie Natrium, Ammonium, Kalium, Kalzium und Magnesium bestimmt. Angaben zu den Analysemethoden und Verfahrenskenndaten befinden sich im Datenanhang (Tab. A 20 und A 21).

Bei der Analyse werden die Konzentrationswerte der Tagesproben bestimmt. Zur Bestimmung der mittleren Konzentrationswerte über z.B einen Monat dürfen diese Werte nicht einfach gemittelt werden, da Tage mit großer Niederschlagsmenge stärker zur Bildung einer Mischprobe beitragen als Tage mit geringem Niederschlag. Es ist eine Gewichtung der Tagesproben über die Niederschlagsmenge vorzunehmen. Diese Mittelwertbildung ist in Formel 1 beschrieben.

**Formel 1:** Berechnung der gewichteten mittleren Konzentration

$$C = \frac{\sum_i c_i V_i}{\sum_i V_i} = \frac{c_1 * V_1 + c_2 * V_2 + c_3 * V_3 + \dots + c_n * V_n}{V_1 + V_2 + V_3 + \dots + V_n}$$

C...gewichtete mittlere Konzentration [mg/l]  
c ..Konzentration [mg/l]  
V..Niederschlagsmenge [mm]

Die Stoffeinträge (Depositionswerte) werden gemäß der Formel 2 aus den Konzentrationswerten und der Niederschlagsmenge berechnet. Hohe Einträge können sowohl durch hohe Konzentrationen als auch durch große Niederschlagsmengen verursacht werden.

**Formel 2:** Berechnung der Deposition

$$D = \frac{c * V}{100}$$

D...Deposition [kg/ha]  
c...Konzentration [mg/l]  
V...Volumen [mm]

Die untersuchten Kationen und Anionen werden im weiteren Bericht wie in Tabelle 2 abgekürzt.

**Tabelle 2:** Abkürzungen der untersuchten Kationen und Anionen

Kationen		Anionen	
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	Ammonium	Cl <sup>-</sup>	Chlorid
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> - N	Ammonium - Stickstoff <sup>1</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Nitrat
Na <sup>+</sup>	Natrium	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> - N	Nitrat - Stickstoff <sup>2</sup>
K <sup>+</sup>	Kalium	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Sulfat
Ca <sup>2+</sup>	Kalzium	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> - S	Sulfat - Schwefel <sup>3</sup>
Mg <sup>2+</sup>	Magnesium		

Die Azidität des Niederschlagswassers wird als pH-Wert und als H<sup>+</sup>-Konzentration dargestellt. Der Eintrag an freier Säure wird als H<sup>+</sup>-Eintrag angegeben. Die Analysendaten der einzelnen Tagesproben sind im Datenanhang dieses Berichts aufgelistet.

<sup>1</sup> Ammonium-Stickstoff bezeichnet die Menge/Konzentration an Stickstoff (N), die in Form des Ammoniumions vorliegt.

<sup>2</sup> Nitrat-Stickstoff bezeichnet die Menge/Konzentration an Stickstoff (N), die in Form des Nitrations vorliegt.

<sup>3</sup> Sulfat-Schwefel bezeichnet die Menge/Konzentration an Schwefel (S), die in Form des Sulfations vorliegt.

### 3. Ergebnisse und Diskussion

#### 3.1. Konzentrations- und Depositionsergebnisse für das Untersuchungsjahr Oktober 2015 bis September 2016

Die mengengewichteten Jahresmittelwerte der Konzentration sowie die Jahreseinträge an den drei Tiroler Messstationen sind in den Tabellen 3 und 4 angeführt. Im Datenanhang sind, ergänzend zu den Jahresmittelwerten, die Ergebnisse für die einzelnen Quartale sowie die Sommer- und Winterhalbjahre angeführt (Tab. A 22 - A 25). Zusätzlich werden alle Ergebnisse auch als Äquivalentkonzentrationen gelistet (Tab. A 26 und 27).

**Tabelle 3:** Mengengewichtete Jahresmittelwerte der Konzentration (mg/L) an Niederschlagsinhaltsstoffen im Zeitraum 01.10.2015 bis 30.09.2016.

NS [mm]	pH [-]	H <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N	K <sup>+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Cl <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> -S
[mg/L]													
<b>Höfen</b>													
1137,6	5,9	0,001	0,07	0,37	0,29	0,05	0,38	0,10	0,13	0,99	0,22	0,40	0,13
<b>Niederndorferberg</b>													
1323,6	5,4	0,004	0,09	0,52	0,41	0,06	0,13	0,02	0,13	1,38	0,31	0,40	0,13
<b>Innervillgraten</b>													
898,1	5,8	0,001	0,07	0,64	0,50	0,12	0,24	0,04	0,13	0,78	0,18	0,43	0,14

**Tabelle 4:** Jahreseintrag (kg/ha) der Niederschlagsinhaltsstoffe (nasse Deposition) im Zeitraum 01.10.2015 bis 30.09.2016.

NS [mm]	pH [-]	H <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N	K <sup>+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Cl <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> -S
[kg/ha]													
<b>Höfen</b>													
1137,6	5,9	0,013	0,83	4,20	3,27	0,52	4,33	1,09	1,52	11,32	2,56	4,53	1,51
<b>Niederndorferberg</b>													
1323,6	5,4	0,051	1,17	6,90	5,37	0,74	1,74	0,28	1,71	18,21	4,11	5,26	1,75
<b>Innervillgraten</b>													
898,1	5,8	0,013	0,63	5,76	4,48	1,09	2,14	0,36	1,16	6,98	1,58	3,84	1,28

Für die Bestimmung des Gesamtsäureeintrags mit dem Niederschlag sind der pH-Wert und die Ionen Sulfat, Nitrat und Ammonium wesentlich. Im Jahresmittel wurden pH-Werte zwischen 5,4 und 5,9 gemessen. Diese Werte können als wenig belastet eingestuft werden, da erst ab einem pH von kleiner 5,0 der Niederschlag als ‚Saurer Regen‘ bezeichnet wird. Sulfat und Nitrat stellen die Anionen der starken Säuren Schwefelsäure und Salpetersäure dar. Schwefelsäure bildet sich in der Atmosphäre aus Schwefeldioxid, während Salpetersäure aus den Stickstoffoxiden (NO<sub>x</sub>, i.e. Stickstoffdioxid und Stickstoffmonoxid) gebildet wird. Schwefeldioxid entsteht vor allem bei der Verbrennung von schwefelhaltigen Brennstoffen (z.B. Kohle) und bei industriellen Prozessen. Die Umwandlung von Schwefeldioxid zu Schwefelsäure dauert mehrere Stunden bis wenige Tage. In dieser Zeit können die Luftschadstoffe (die Ausgangsprodukte aber auch das gebildete Sulfat) durch Windströmungen mehrere 100 km transportiert werden und so große Gebiete beeinflussen. In den vergangenen Jahrzehnten wurden die Emissionen von Schwefeldioxid in Österreich und in den Nachbarländern deutlich reduziert. Entsprechend sind die Konzentrationswerte für Sulfat an den drei Messstandorten in

Tirol gering und relativ ähnlich. Stickoxide entstehen hauptsächlich bei Verbrennungsprozessen. Die Hauptquellen sind Verbrennungsmotoren und Feuerungsanlagen für Kohle, Öl, Gas, Holz und Abfälle. Die Stickoxide fördern die Feinstaubbildung und treiben zusammen mit flüchtigen Kohlenwasserstoffen die sommerliche Ozonbildung voran. Stickoxide und deren Umwandlungsprodukte (wie z.B. Nitrat) werden ebenfalls mit dem Wind verfrachtet und tragen daher sowohl lokal, als auch regional zu einer Belastung der Atmosphäre und von Ökosystemen bei.

Der Jahresmittelwert der Nitrat-Konzentration an der Messstelle Niederndorferberg war im Untersuchungszeitraum etwas höher als an den anderen beiden Messstationen in Tirol (Tabelle 3). Dies zeigt, dass für diesen Luftschadstoff bzw. dessen Vorläufersubstanzen etwas mehr lokale Emissionsunterschiede in Tirol vorherrschen als vergleichsweise für Schwefeldioxid bzw. Sulfat. In der Atmosphäre können Schwefelsäure und Salpetersäure von Ammoniak neutralisiert werden, wobei sich Ammoniumsulfat und Ammoniumnitrat bilden. Der wichtigste Emittent von Ammoniak ist die Landwirtschaft. Aus diesem Grund können gerade in ländlichen Gebieten deutliche lokale Unterschiede in den Konzentrationswerten für Ammonium auftreten. Nach dem Eintrag wird Ammonium abgebaut, was zur Säurebildung in Gewässern und Böden führt. Abgesehen von der Bildung des ‚Sauren Regens‘ können die Einträge von Nitrat-Stickstoff und Ammonium-Stickstoff zu einer Überdüngung des Bodens und der Gewässer führen und müssen auch deshalb überwacht werden.

Für die Konzentrationswerte von Kalzium, Magnesium, Natrium, Kalium und Chlorid sind unterschiedliche Emissionsquellen verantwortlich. So führt beispielsweise eine Beeinflussung durch Mineralstaub, der lokal oder auch über Ferntransport (z.B. Wüstenstaub, der in Österreich großteils aus der Sahara stammt) eingebracht werden kann, zu einer Erhöhung der Werte. Entsprechend kommt es lokal und auch zeitlich zu deutlichen Unterschieden der Konzentrationswerte. Weiters können auch Verbrennungsprozesse zu einer Erhöhung der Kalium- oder Chloridkonzentrationen führen.

Die jährliche Niederschlagsmenge ist an der inneralpinen Messstelle Innervillgraten geringer als an den Messstellen in Höfen und Niederndorferberg am nördlichen Alpenhauptkamm. Da sich der Stoffeintrag aus dem Produkt von Niederschlagsmenge und Konzentration berechnet (Formel 2), ergeben sich andere Verteilungsmuster bei den Eintragungsmengen als bei den Konzentrationswerten (vgl. Tabellen 3 und 4). So ist beispielsweise der Eintrag an Sulfat an der inneralpinen Messstelle etwas geringer als in Höfen und Niederndorferberg, obwohl die Konzentrationswerte nahezu gleich sind. Für Nitrat wird in Niederndorferberg der höchste Konzentrationswert bestimmt. Da auch die Niederschlagsmenge höher ist als an den weiteren Messstellen in Tirol, verstärken sich die Unterschiede zwischen den Messstellen, wenn der Stoffeintrag betrachtet wird. Für Ammonium kehrt sich der Trend um. In Innervillgraten wird im Jahresmittel zwar die höchste Konzentration gemessen, der Stoffeintrag ist allerdings in Niederndorferberg höher.

Abbildung 7 zeigt einen Vergleich der jährlichen Depositionsmengen der untersuchten Ionen. Ammonium, Nitrat, Sulfat, Kalzium und auch Chlorid zeigten im Untersuchungsjahr die höchsten Stoffeinträge (kg/ha).

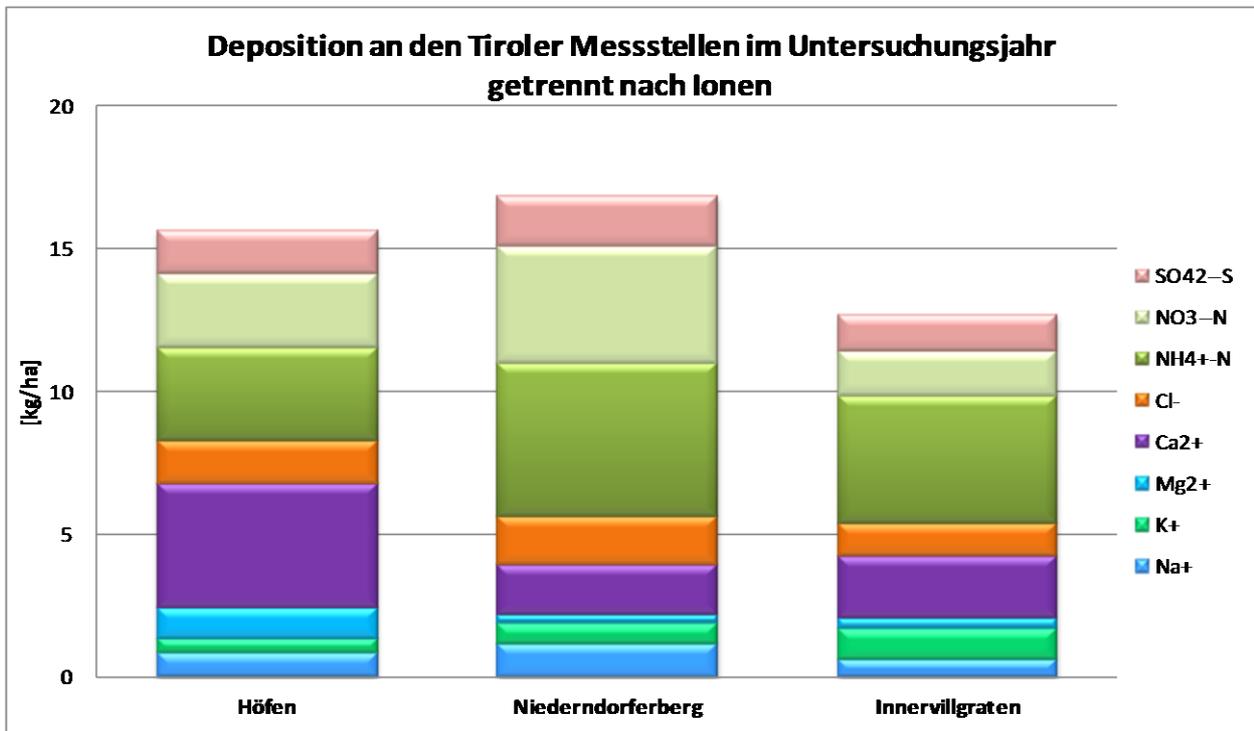


Abbildung 7: Deposition der einzelnen Komponenten an den Tiroler Messstellen im Jahr 2015/16.

### 3.2. Veränderung der Konzentrations- und Depositionswerte im Jahresverlauf

Bereits Horváth und Mészáros (1984) sowie Rodhe und Granat (1984) untersuchten die jahreszeitlichen Abhängigkeiten der Sulfat- und Nitratkonzentrationen im Niederschlagswasser an verschiedenen Standorten in Europa. Übereinstimmend stellten sie die geringsten Ionenkonzentrationen während der Wintermonate fest und beschrieben ein Konzentrationsmaximum im Frühjahr (März bis April). Auch die Messungen in Österreich zeigen diese saisonabhängigen Veränderungen, die neben Sulfat und Nitrat auch für Ammonium beobachtet werden können. Jahreszeitlich unterschiedlich starke Emissionen der Vorläufersubstanzen (Schwefeldioxid, Ammoniak), Unterschiede bei luftchemischen Prozessen (Oxidation von Schwefeldioxid und den Stickstoffoxiden) und Änderungen in den meteorologischen Ausbreitungsbedingungen bewirken diese saisonabhängigen Veränderungen der Ionenkonzentrationswerte im Niederschlagswasser (Hedin et al. 1991, Kasper und Puxbaum 1994, Hand et al. 2012).

Für Natrium, Kalium, Magnesium, Kalzium und Chlorid sind keine so stetigen saisonalen Änderungen der Konzentrationswerte zu erkennen. Hier werden die Konzentrationsverläufe viel stärker durch Episoden (z.B. lokaler Einfluss oder Ferntransport von Mineralsstaub) geprägt.

Betrachtet man die saisonalen Verläufe der Depositionswerte, so ergibt sich ein verändertes Bild. Im Sommer treten zumeist die höchsten Niederschlagsmengen auf. Daraus ergeben sich auch höhere Ioneneinträge in dieser Zeit. Besonders deutlich wird dies an der Station Innervillgraten. Die entsprechenden Niederschlagsmengen waren 219 mm im Winterhalbjahr und 679 mm im Sommerhalbjahr. In Kombination mit den saisonalen Konzentrationswerten ergibt sich eine dreimal so hohe Deposition von Sulfat-Schwefel im Sommer als im Winterhalbjahr. Die Deposition von Ammonium-Stickstoff war im Sommer viermal höher, die Deposition von Nitrat-Stickstoff 1,5 Mal höher als im Winterhalbjahr.

Die Tabellen 5 bis 7 listen die Monatsmittelwerte der Konzentrationswerte und die Tabellen 8 bis 10 die dazugehörigen monatlichen Depositionsraten auf, die an den drei Messstellen in Tirol bestimmt wurden.

**Tabelle 5:** Mengengewichtete Monatsmittelwerte der Konzentration an Niederschlagsinhaltsstoffen (in mg/L) in **Höfen**

Monat	NS	pH	H <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N	K <sup>+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Cl <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> -S
	[mm]	[-]					[mg/L]				
Okt.15	66,5	5,7	0,002	0,13	0,17	0,05	0,42	0,09	0,17	0,23	0,14
Nov.15	0										
Dez.15	25,9	6,4	0,000	0,19	0,07	0,04	1,30	0,29	0,30	0,12	0,14
Jän.16	165,8	6,0	0,001	0,11	0,09	0,03	0,71	0,16	0,17	0,16	0,19
Feb.16	96,3	5,7	0,002	0,07	0,10	0,03	0,20	0,06	0,09	0,17	0,05
Mär.16	32,4	6,4	0,000	0,09	0,49	0,05	0,81	0,29	0,12	0,38	0,09
Apr.16	52,9	6,4	0,000	0,09	0,36	0,05	1,01	0,26	0,18	0,44	0,19
Mai.16	127,6	6,0	0,001	0,09	0,45	0,07	0,27	0,08	0,11	0,33	0,16
Jun.16	194,4	5,9	0,001	0,03	0,32	0,07	0,18	0,05	0,05	0,17	0,10
Jul.16	152,3	6,0	0,001	0,04	0,43	0,04	0,26	0,05	0,26	0,24	0,16
Aug.16	142,4	5,9	0,001	0,07	0,37	0,03	0,21	0,05	0,09	0,22	0,12
Sep.16	81,1	6,0	0,001	0,03	0,22	0,03	0,20	0,05	0,08	0,20	0,10

**Tabelle 6:** Mengengewichtete Monatsmittelwerte der Konzentration an Niederschlagsinhaltsstoffen (in mg/L) in **Niederndorferberg**

Monat	NS	pH	H <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N	K <sup>+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Cl <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> -S
	[mm]	[-]					[mg/L]				
Okt.15	71,6	5,2	0,007	0,03	0,29	0,04	0,07	0,01	0,08	0,39	0,08
Nov.15	35,4	5,3	0,005	0,06	0,39	0,03	0,07	0,02	0,12	0,43	0,11
Dez.15	34,3	6,3	0,001	0,06	0,14	0,03	0,03	0,01	0,11	0,13	0,06
Jän.16	112,4	5,1	0,009	0,29	0,18	0,06	0,10	0,02	0,23	0,32	0,08
Feb.16	51,3	4,9	0,013	0,08	0,27	0,03	0,14	0,02	0,18	0,43	0,09
Mär.16	56,3	5,2	0,006	0,10	0,68	0,03	0,08	0,02	0,15	0,62	0,17
Apr.16	94,2	5,5	0,003	0,07	0,48	0,03	0,21	0,03	0,14	0,40	0,14
Mai.16	198,3	5,6	0,003	0,07	0,62	0,07	0,15	0,02	0,12	0,36	0,19
Jun.16	227,4	5,5	0,003	0,04	0,26	0,08	0,08	0,01	0,06	0,20	0,11
Jul.16	188,3	5,9	0,001	0,06	0,54	0,06	0,23	0,03	0,13	0,29	0,17
Aug.16	145,6	5,9	0,001	0,14	0,44	0,06	0,15	0,03	0,21	0,23	0,13
Sep.16	108,5	5,4	0,004	0,07	0,30	0,03	0,08	0,01	0,08	0,26	0,12

**Tabelle 7:** Mengengewichtete Monatsmittelwerte der Konzentration an Niederschlagsinhaltsstoffen (in mg/L) in **Innervillgraten**

Monat	NS	pH	H <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N	K <sup>+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Cl <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> -S
	[mm]	[-]					[mg/L]				
Okt.15	72,9	6,5	0,000	0,06	0,61	0,28	0,06	0,04	0,15	0,12	0,09
Nov.15	5,6	6,8	0,000	0,05	1,07	0,24	0,13	0,06	0,11	0,41	0,12
Dez.15	0										
Jän.16	30,2	6,2	0,001	0,04	0,64	0,12	0,03	0,02	0,10	0,13	0,04
Feb.16	52,1	6,1	0,001	0,04	0,29	0,05	0,15	0,05	0,07	0,15	0,04
Mär.16	58,5	5,4	0,004	0,03	0,07	0,03	0,01	0,01	0,05	0,10	0,02
Apr.16	84,1	6,5	0,000	0,29	0,64	0,41	1,45	0,14	0,48	0,39	0,40
Mai.16	84,6	6,2	0,001	0,05	0,55	0,16	0,12	0,05	0,11	0,20	0,16
Jun.16	179,5	6,3	0,000	0,06	0,62	0,08	0,11	0,03	0,10	0,18	0,15
Jul.16	121,0	5,4	0,004	0,06	0,31	0,03	0,21	0,03	0,11	0,20	0,17
Aug.16	167,8	5,6	0,002	0,04	0,16	0,04	0,09	0,02	0,05	0,10	0,09
Sep.16	41,7	7,0	0,000	0,04	2,00	0,12	0,18	0,02	0,11	0,16	0,12

**Tabelle 8:** Monatliche nasse Deposition der Niederschlagsinhaltsstoffe (in kg/ha) in **Höfen**

Monat	NS	pH	H <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N	K <sup>+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Cl <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> -S
	[mm]	[-]					[kg/ha]				
Okt.15	66,5	5,7	0,001	0,09	0,11	0,03	0,28	0,06	0,11	0,15	0,10
Nov.15	0		0	0	0	0	0	0	0	0	0
Dez.15	25,9	6,4	0,000	0,05	0,02	0,01	0,34	0,07	0,08	0,03	0,04
Jän.16	165,8	6,0	0,002	0,18	0,15	0,06	1,17	0,27	0,28	0,27	0,31
Feb.16	96,3	5,7	0,002	0,06	0,09	0,03	0,19	0,06	0,09	0,16	0,05
Mär.16	32,4	6,4	0,000	0,03	0,16	0,01	0,26	0,10	0,04	0,12	0,03
Apr.16	52,9	6,4	0,000	0,05	0,19	0,03	0,53	0,14	0,09	0,24	0,10
Mai.16	127,6	6,0	0,001	0,11	0,57	0,09	0,34	0,10	0,14	0,42	0,20
Jun.16	194,4	5,9	0,003	0,07	0,61	0,14	0,36	0,10	0,10	0,33	0,20
Jul.16	152,3	6,0	0,001	0,06	0,66	0,06	0,39	0,08	0,39	0,36	0,24
Aug.16	142,4	5,9	0,002	0,10	0,52	0,05	0,30	0,07	0,13	0,31	0,17
Sep.16	81,1	6,0	0,001	0,03	0,18	0,02	0,16	0,04	0,07	0,16	0,08

**Tabelle 9:** Monatliche nasse Deposition der Niederschlagsinhaltsstoffe (in kg/ha) in **Niederndorferberg**

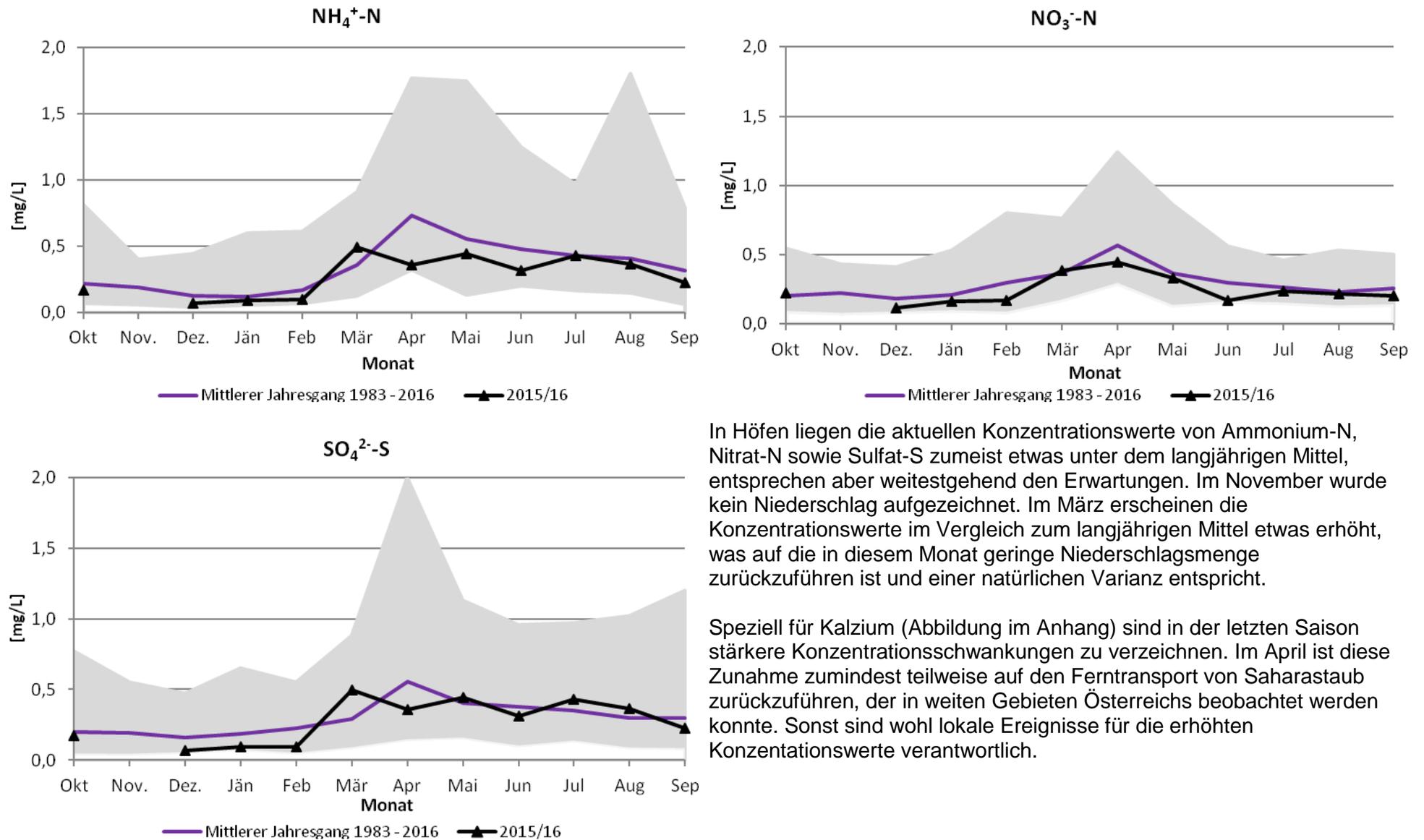
Monat	NS	pH	H <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N	K <sup>+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Cl <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> -S
	[mm]	[-]					[kg/ha]				
Okt.15	71,6	5,2	0,005	0,02	0,21	0,03	0,05	0,01	0,06	0,28	0,06
Nov.15	35,4	5,3	0,002	0,02	0,14	0,01	0,02	0,01	0,04	0,15	0,04
Dez.15	34,3	6,3	0,000	0,02	0,05	0,01	0,01	0,00	0,04	0,04	0,02
Jän.16	112,4	5,1	0,010	0,32	0,21	0,07	0,11	0,03	0,26	0,35	0,09
Feb.16	51,3	4,9	0,007	0,04	0,14	0,02	0,07	0,01	0,09	0,22	0,05
Mär.16	56,3	5,2	0,003	0,06	0,39	0,02	0,05	0,01	0,08	0,35	0,09
Apr.16	94,2	5,5	0,003	0,07	0,45	0,03	0,19	0,02	0,13	0,38	0,13
Mai.16	198,3	5,6	0,005	0,13	1,23	0,13	0,31	0,05	0,25	0,71	0,38
Jun.16	227,4	5,5	0,007	0,09	0,59	0,19	0,18	0,03	0,13	0,46	0,26
Jul.16	188,3	5,9	0,002	0,12	1,02	0,12	0,44	0,05	0,25	0,54	0,31
Aug.16	145,6	5,9	0,002	0,21	0,64	0,09	0,22	0,04	0,30	0,34	0,19
Sep.16	108,5	5,4	0,004	0,07	0,32	0,03	0,09	0,01	0,08	0,28	0,13

**Tabelle 10:** Monatliche nasse Deposition der Niederschlagsinhaltsstoffe (in kg/ha) in **Innevillgraten**

Monat	NS	pH	H <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N	K <sup>+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Cl <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> -S
	[mm]	[-]					[kg/ha]				
Okt.15	72,9	6,5	0,000	0,04	0,45	0,21	0,04	0,03	0,11	0,08	0,07
Nov.15	5,6	6,8	0,000	0,00	0,06	0,01	0,01	0,00	0,01	0,02	0,01
Dez.15	0		0	0	0	0	0	0	0	0	0
Jän.16	30,2	6,2	0,000	0,01	0,19	0,04	0,01	0,01	0,03	0,04	0,01
Feb.16	52,1	6,1	0,000	0,02	0,15	0,03	0,08	0,03	0,04	0,08	0,02
Mär.16	58,5	5,4	0,002	0,01	0,04	0,01	0,01	0,00	0,03	0,06	0,01
Apr.16	84,1	6,5	0,000	0,24	0,54	0,35	1,22	0,12	0,40	0,33	0,34
Mai.16	84,6	6,2	0,000	0,04	0,47	0,14	0,10	0,04	0,09	0,17	0,14
Jun.16	179,5	6,3	0,001	0,11	1,11	0,15	0,19	0,05	0,19	0,32	0,27
Jul.16	121,0	5,4	0,004	0,07	0,38	0,04	0,26	0,04	0,13	0,24	0,21
Aug.16	167,8	5,6	0,004	0,07	0,27	0,07	0,15	0,03	0,09	0,16	0,16
Sep.16	41,7	7,0	0,000	0,02	0,83	0,05	0,07	0,01	0,05	0,07	0,05

In der Folge werden die Ergebnisse für Ammonium-N, Nitrat-N und Sulfat-S, geordnet nach den drei Messstellen in Tirol, graphisch dargestellt. Diese Auswahl wurde getroffen, da die genannten Komponenten für den Säureeintrag und die Eutrophierung von Ökosystemen wesentlich sind. Die Abbildungen 8, 10 und 12 zeigen die Jahresgänge der vergangenen Jahre sowie die aktuellen Konzentrationswerte. Die Abbildungen 9, 11 und 13 stellen die Ergebnisse der Depositionswerte analog dar. An den Messstellen Höfen (November 2015) und Innervillgraten (Dezember 2015) wurde während eines ganzen Monats kein Niederschlag erfasst, weshalb diese Datenpunkte bei den Abbildungen der Konzentrationswerte fehlen. Zur Berechnung der vergangenen Monatsmittel wurden jeweils die Konzentrationswerte oder Ioneneinträge eines jeden Monats (also alle Jännerwerte, alle Februarwerte, usw.) seit Beginn der Messungen volumengewichtet gemittelt. Der direkte Vergleich zwischen aktuellem und langjährigem Mittel ermöglicht ein unmittelbares Erkennen von Besonderheiten der diesjährigen Untersuchungsperiode. Der grau markierte Bereich stellt die maximalen und minimalen Monatsmittelwerte dar, die seit Beginn der Messungen erfasst wurden.

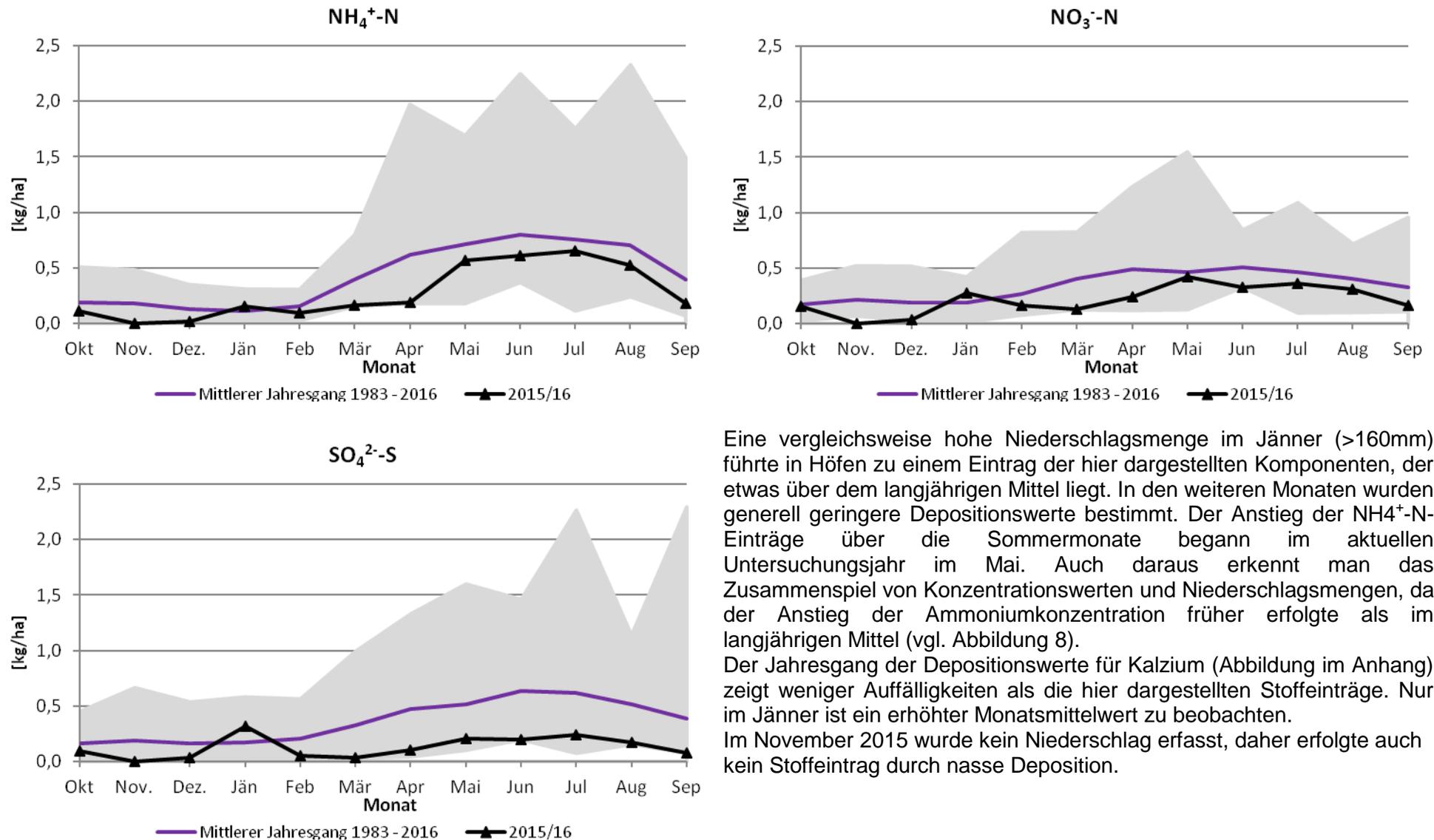
Zusätzlich zu den saisonabhängigen Unterschieden des Ioneneintrags, die über die Monatsmittelwerte und den daraus abgeleiteten Jahresgängen dargestellt werden, treten starke tägliche Unterschiede auf. Der Ioneneintrag durch die nasse Deposition ist ungleichmäßig verteilt (Smith und Hunt, 1978). Durch Phasen ohne Niederschlag werden die Ionen "schubweise" deponiert. Diese Aussage kann durch folgendes Beispiel verdeutlicht werden: an der Station Innervillgraten fielen am niederschlagsstärksten Tag (9.8.2016) 55 mm Niederschlag, während im Vergleich dazu im November 2015 nur insgesamt 5,6 mm zu verzeichnen waren. Eine detailliertere Betrachtung der Tagesproben und des Zusammenhangs zwischen der Niederschlagsmenge und der Stoffkonzentration erfolgt im Abschnitt 3.5.



In Höfen liegen die aktuellen Konzentrationswerte von Ammonium-N, Nitrat-N sowie Sulfat-S zumeist etwas unter dem langjährigen Mittel, entsprechen aber weitestgehend den Erwartungen. Im November wurde kein Niederschlag aufgezeichnet. Im März erscheinen die Konzentrationswerte im Vergleich zum langjährigen Mittel etwas erhöht, was auf die in diesem Monat geringe Niederschlagsmenge zurückzuführen ist und einer natürlichen Varianz entspricht.

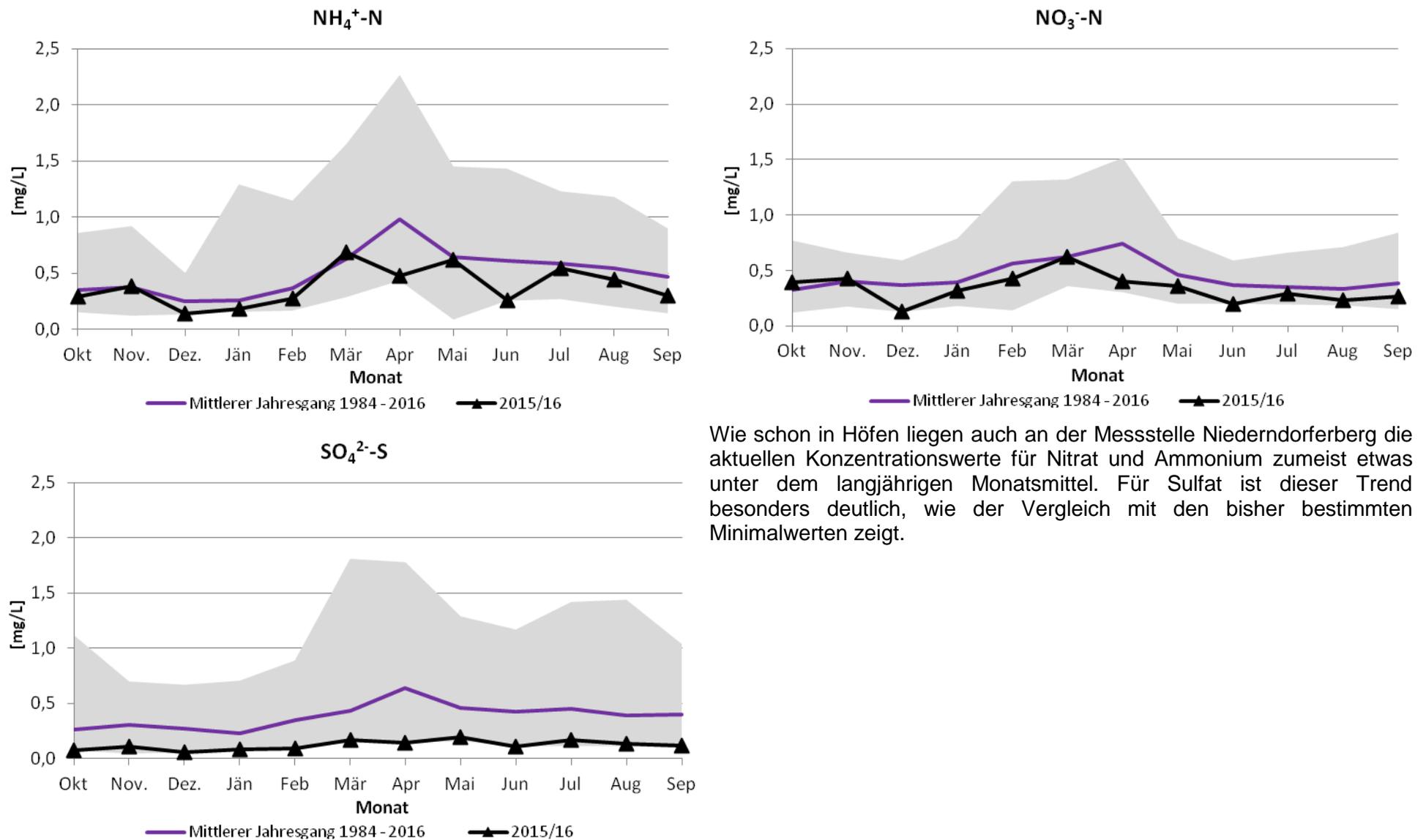
Speziell für Kalzium (Abbildung im Anhang) sind in der letzten Saison stärkere Konzentrationsschwankungen zu verzeichnen. Im April ist diese Zunahme zumindest teilweise auf den Ferntransport von Saharastaub zurückzuführen, der in weiten Gebieten Österreichs beobachtet werden konnte. Sonst sind wohl lokale Ereignisse für die erhöhten Konzentrationswerte verantwortlich.

**Abbildung. 8:** Darstellung der mittleren monatlichen Konzentrationen in der Untersuchungsperiode 2015/16 im Vergleich zu den mittleren Jahresgängen an der Messstelle in **Höfen**. Die grau hinterlegte Fläche stellt den Bereich zwischen den bisher aufgetretenen Minima und Maxima der Monatswerte dar.



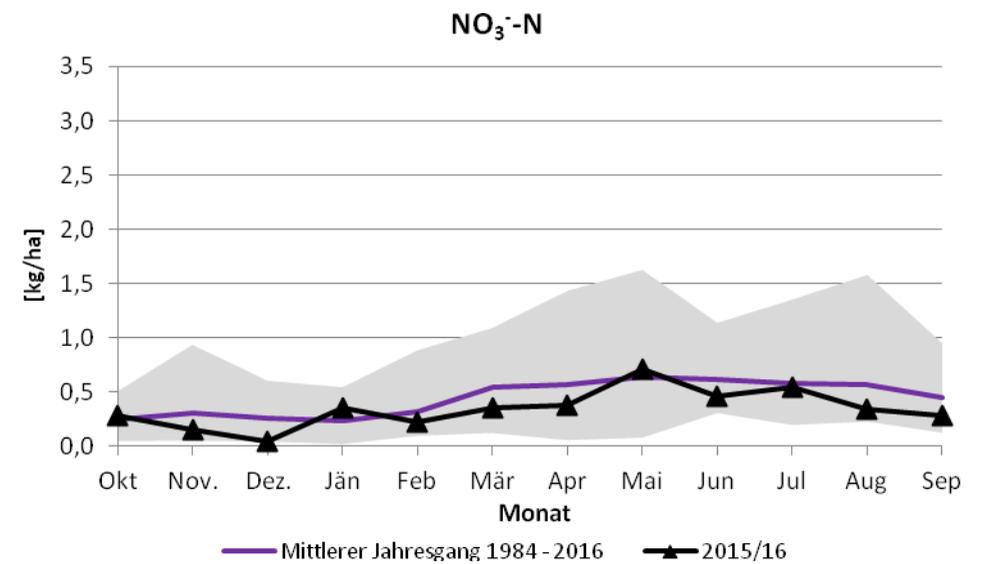
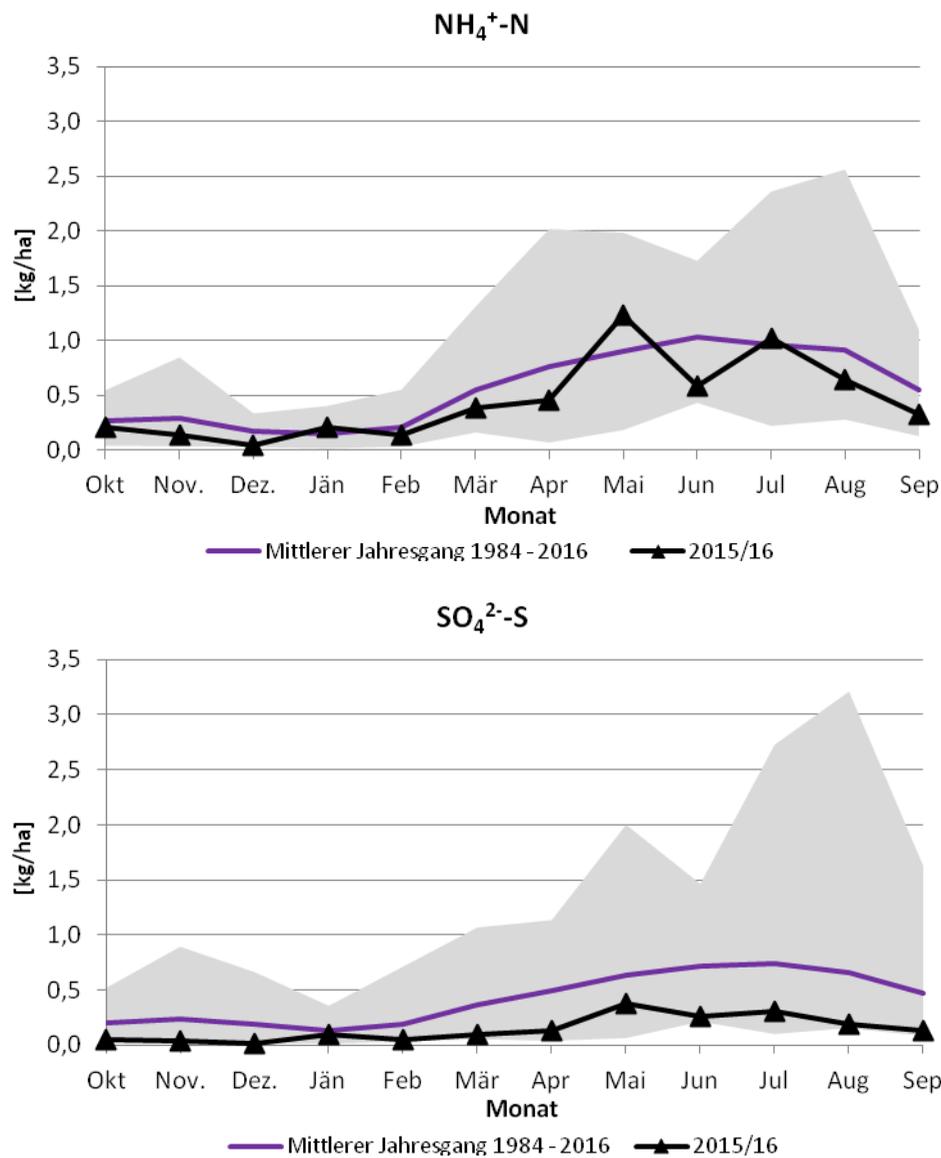
Eine vergleichsweise hohe Niederschlagsmenge im Jänner (>160mm) führte in Höfen zu einem Eintrag der hier dargestellten Komponenten, der etwas über dem langjährigen Mittel liegt. In den weiteren Monaten wurden generell geringere Depositionswerte bestimmt. Der Anstieg der NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N-Einträge über die Sommermonate begann im aktuellen Untersuchungsjahr im Mai. Auch daraus erkennt man das Zusammenspiel von Konzentrationswerten und Niederschlagsmengen, da der Anstieg der Ammoniumkonzentration früher erfolgte als im langjährigen Mittel (vgl. Abbildung 8). Der Jahresgang der Depositionswerte für Kalzium (Abbildung im Anhang) zeigt weniger Auffälligkeiten als die hier dargestellten Stoffeinträge. Nur im Jänner ist ein erhöhter Monatsmittelwert zu beobachten. Im November 2015 wurde kein Niederschlag erfasst, daher erfolgte auch kein Stoffeintrag durch nasse Deposition.

**Abbildung 9:** Darstellung der mittleren monatlichen Einträge in der Untersuchungsperiode 2015/16 im Vergleich zu den mittleren Jahresgängen an der Messstelle in Höfen. Die grau hinterlegte Fläche stellt den Bereich zwischen den bisher aufgetretenen Minima und Maxima der Monateinträge dar.



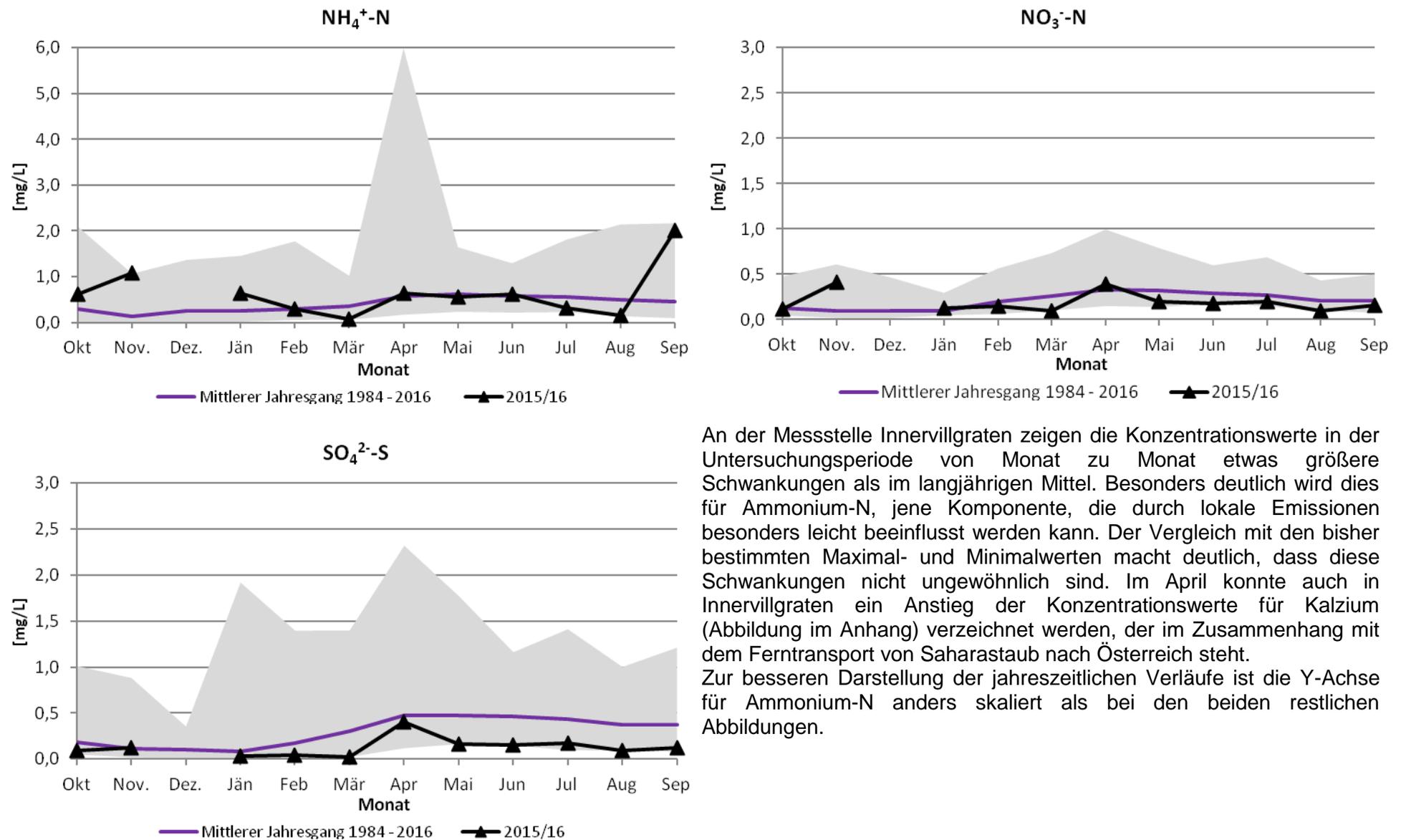
Wie schon in Höfen liegen auch an der Messstelle Niederndorferberg die aktuellen Konzentrationswerte für Nitrat und Ammonium zumeist etwas unter dem langjährigen Monatsmittel. Für Sulfat ist dieser Trend besonders deutlich, wie der Vergleich mit den bisher bestimmten Minimalwerten zeigt.

**Abbildung 10:** Darstellung der mittleren monatlichen Konzentrationen in der Untersuchungsperiode 2015/16 im Vergleich zu den mittleren Jahresgängen an der Messstelle in **Niederndorferberg**. Die grau hinterlegte Fläche stellt den Bereich zwischen den bisher aufgetretenen Minima und Maxima der Monatswerte dar.



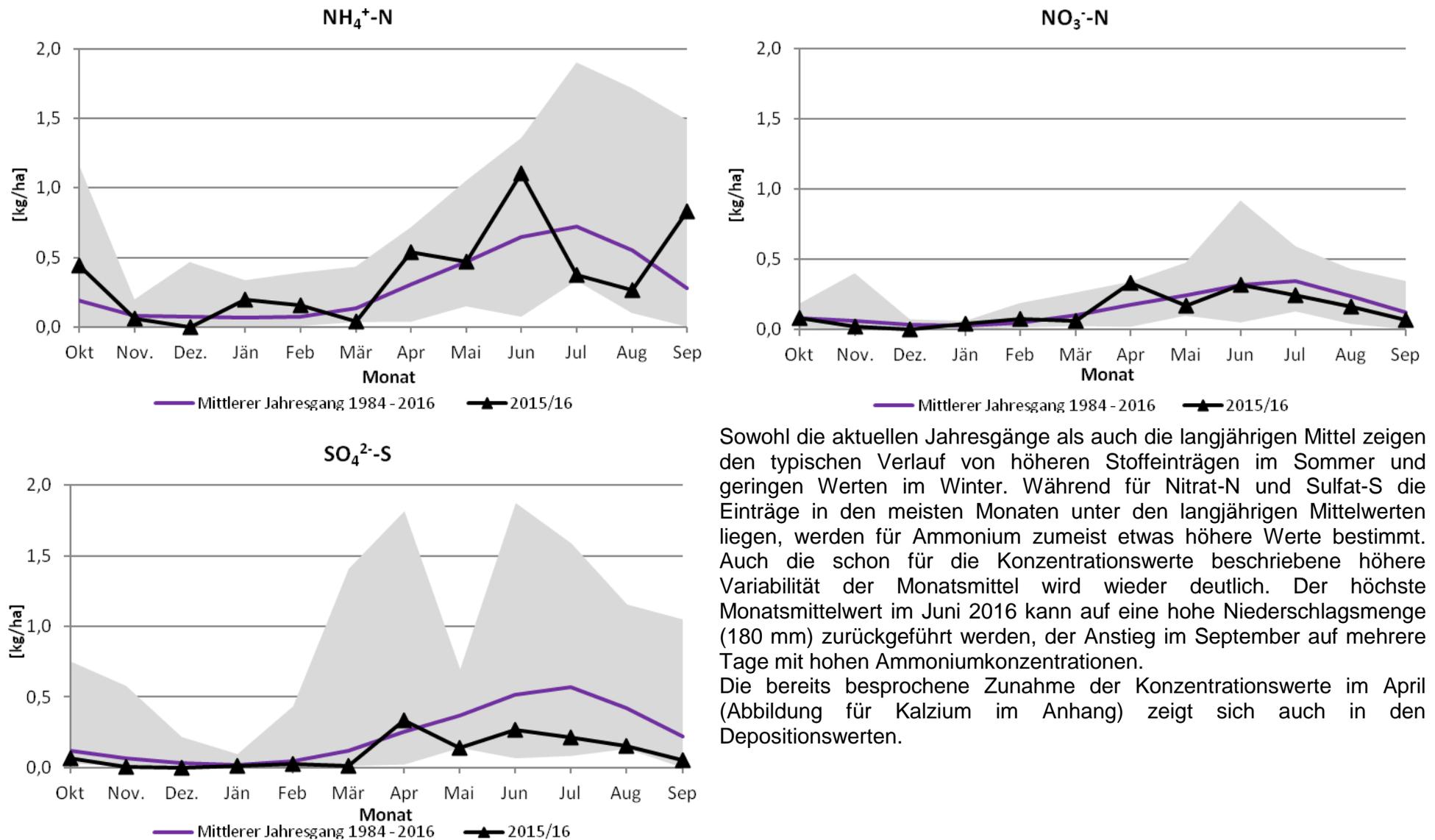
Auch die Stoffeinträge in Niederndorferberg lagen zumeist unter den langjährigen Monatsmittelwerten. Die Unterschiede sind aber nicht so deutlich ausgeprägt wie bei den Konzentrationswerten in Abbildung 10. In den Monaten Jänner, Mai und Juli erreichten die Stoffeinträge von Nitrat-N und Ammonium-N die langjährigen Mittel, oder lagen etwas darüber. Dies ist vor allem durch die höheren Niederschlagsmengen zu erklären. Grundsätzlich folgen die jahreszeitlichen Verläufe den Erwartungen mit höheren Stoffeinträgen in den Sommermonaten und geringeren Werten in der kalten Jahreszeit.

**Abbildung 11:** Darstellung der mittleren monatlichen Einträgen in der Untersuchungsperiode 2015/16 im Vergleich zu den mittleren Jahresgängen an der Messstelle in **Niederndorferberg**. Die grau hinterlegte Fläche stellt den Bereich zwischen den bisher aufgetretenen Minima und Maxima der Monateinträge dar.



An der Messstelle Innervillgraten zeigen die Konzentrationswerte in der Untersuchungsperiode von Monat zu Monat etwas größere Schwankungen als im langjährigen Mittel. Besonders deutlich wird dies für Ammonium-N, jene Komponente, die durch lokale Emissionen besonders leicht beeinflusst werden kann. Der Vergleich mit den bisher bestimmten Maximal- und Minimalwerten macht deutlich, dass diese Schwankungen nicht ungewöhnlich sind. Im April konnte auch in Innervillgraten ein Anstieg der Konzentrationswerte für Kalzium (Abbildung im Anhang) verzeichnet werden, der im Zusammenhang mit dem Ferntransport von Saharastaub nach Österreich steht. Zur besseren Darstellung der jahreszeitlichen Verläufe ist die Y-Achse für Ammonium-N anders skaliert als bei den beiden restlichen Abbildungen.

**Abbildung 12:** Darstellung der mittleren monatlichen Konzentrationen in der Untersuchungsperiode 2015/16 im Vergleich zu den mittleren Jahresgängen an der Messstelle in **Innervillgraten**. Die grau hinterlegte Fläche stellt den Bereich zwischen den bisher aufgetretenen Minima und Maxima der Monatswerte dar.



Sowohl die aktuellen Jahresgänge als auch die langjährigen Mittel zeigen den typischen Verlauf von höheren Stoffeinträgen im Sommer und geringen Werten im Winter. Während für Nitrat-N und Sulfat-S die Einträge in den meisten Monaten unter den langjährigen Mittelwerten liegen, werden für Ammonium zumeist etwas höhere Werte bestimmt. Auch die schon für die Konzentrationswerte beschriebene höhere Variabilität der Monatsmittel wird wieder deutlich. Der höchste Monatsmittelwert im Juni 2016 kann auf eine hohe Niederschlagsmenge (180 mm) zurückgeführt werden, der Anstieg im September auf mehrere Tage mit hohen Ammoniumkonzentrationen. Die bereits besprochene Zunahme der Konzentrationswerte im April (Abbildung für Kalzium im Anhang) zeigt sich auch in den Depositionswerten.

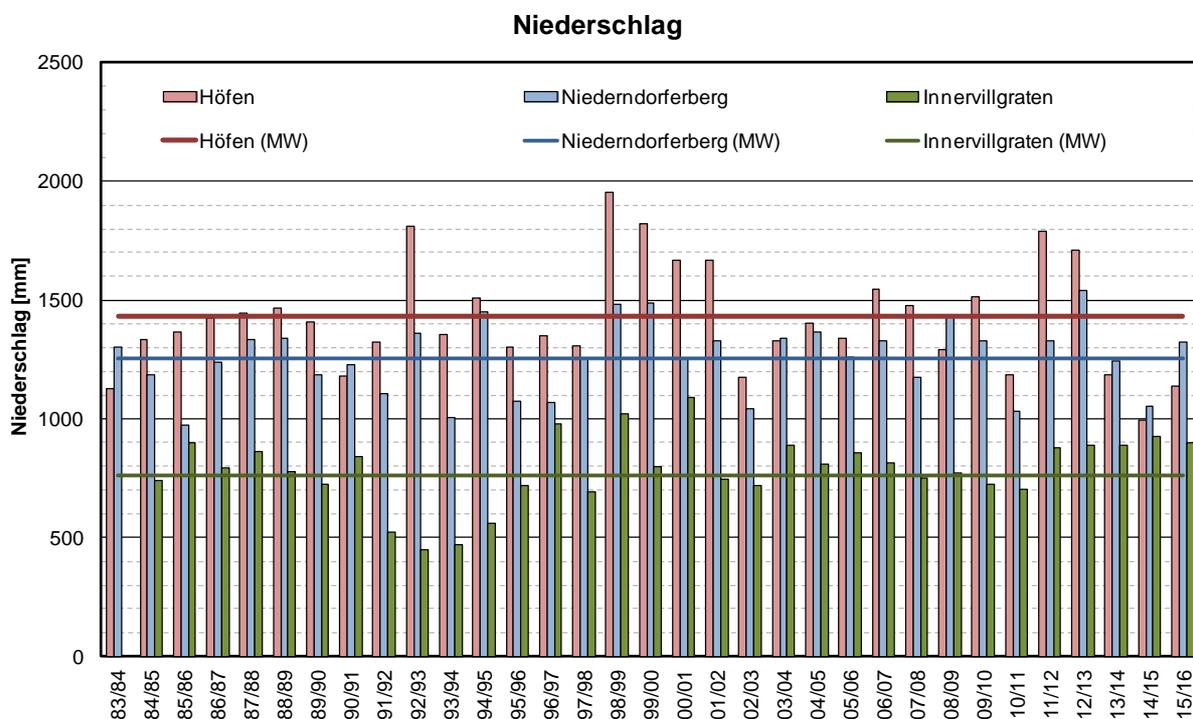
**Abbildung 13:** Darstellung der mittleren monatlichen Einträge in der Untersuchungsperiode 2015/16 im Vergleich zu den mittleren Jahresgängen an der Messtelle in **Innervillgraten**. Die grau hinterlegte Fläche stellt den Bereich zwischen den bisher aufgetretenen Minima und Maxima der Monateinträge dar.

### 3.3 Entwicklung der jährlichen Konzentrations- und Depositionswerte seit Beginn der Messungen

Zur Ermittlung zeitlicher Trends werden in den Abbildungen 14 bis 17 die jährlichen Niederschlagsmengen, die Jahresmittel des pH-Werts und der Ionenkonzentrationen sowie die Jahreseinträge der Schwefel- und Stickstoffkomponenten im zeitlichen Verlauf dargestellt. Über den Rangkorrelationskoeffizient „Kendalls Tau“ wird statistisch geprüft, ob eine signifikante Veränderung der Konzentrations- oder der Depositionswerte vorliegt (Signifikanzniveau  $p=0,05$ ). Für die Parameter, die eine signifikante Veränderung zeigen, wird die absolute Änderung der Konzentrations- oder Depositionswerte über den gesamten Beobachtungszeitraum berechnet. Dies erfolgt über die Theil Sen's Regression. Auf signifikante Änderungen wird im Text verwiesen.

#### 3.3.1 Entwicklung der Niederschlagsmengen

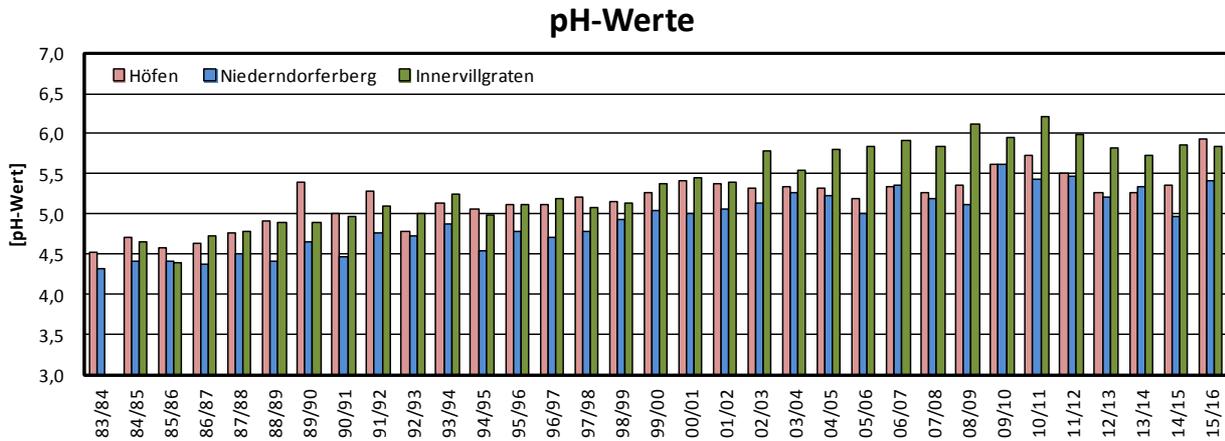
In Höfen und Niederndorferberg wurden stets höhere Niederschlagsmengen verzeichnet als am inneralpinen Standort in Innervillgraten (Abb. 14). Von Jahr zu Jahr treten teilweise deutliche Unterschiede in den Niederschlagsmengen auf. So lagen in den letzten 20 Untersuchungsperioden in Niederndorferberg und Höfen die Niederschlagsmengen nur fünf Mal unter 1200 mm. In Innervillgraten hingegen wurde bisher nur während zwei Saisonen eine Niederschlagsmenge von mehr als 1000 mm verzeichnet. Die aktuelle Untersuchungsperiode bestätigt diesen Trend wieder. So unterscheiden sich die Niederschlagsmengen von 1138 mm in Höfen und 1324 mm in Niederndorferberg deutlich von 898 mm in Innervillgraten. Die Niederschlagsmenge in Höfen zählt zu den zuvor genannten fünf Perioden mit Werten unter 1200 mm.



**Abbildung 14:** Darstellung der jährlichen Niederschlagsmengen seit Beginn der Messungen. Die Linien zeigen die durchschnittlichen Regenmengen erfasst durch das WADOS-Messgerät an den jeweiligen Messstellen seit Beginn der Messungen.

### 3.3.2 Entwicklung der pH-Werte der Regenwässer an den Messstellen

Seit den 1980er-Jahren ist eine signifikante Zunahme des pH-Wertes von rund 4,5 auf 5,5 zu erkennen (Abb. 15). Die Werte liegen nun in einem Bereich, der hinsichtlich der Azidität dem wenig bis unbelasteten Regen entspricht. Dies bringt die abnehmende Schadstoffbelastung der Luft, speziell mit Sulfat, zum Ausdruck (siehe folgender Abschnitt).



**Abbildung 15:** Jahresmittelwerte der pH-Werte seit Beginn der Messungen an den drei Tiroler Messstellen.

### 3.3.3 Entwicklung der Sulfatkonzentrationen und Sulfatdepositionen

Der zeitliche Verlauf zeigt an allen Messstellen fallende Konzentrationswerte für Sulfat, auch wenn in einzelnen Jahren eine vorübergehende Zunahme zu erkennen war (Abb.16). In den letzten Jahren sind, bei allgemein geringen Konzentrationswerten, die Unterschiede zwischen den drei Tiroler Messstellen deutlich geringer als zu Beginn der Messungen.

Auch die heutigen Depositionswerte für Sulfat-Schwefel sind im Vergleich zu den Messungen der 80er-Jahre an allen Stationen deutlich geringer (Abb. 17). Ab der Untersuchungsperiode 2009/10 wurde keine Überschreitung der kritischen Belastungsgrenze von Ökosystemen (entspricht mehr als 3 kg Schwefeleintrag pro Hektar und Jahr gemäß „Critical load“-Konzept, WHO 1995) mehr festgestellt.

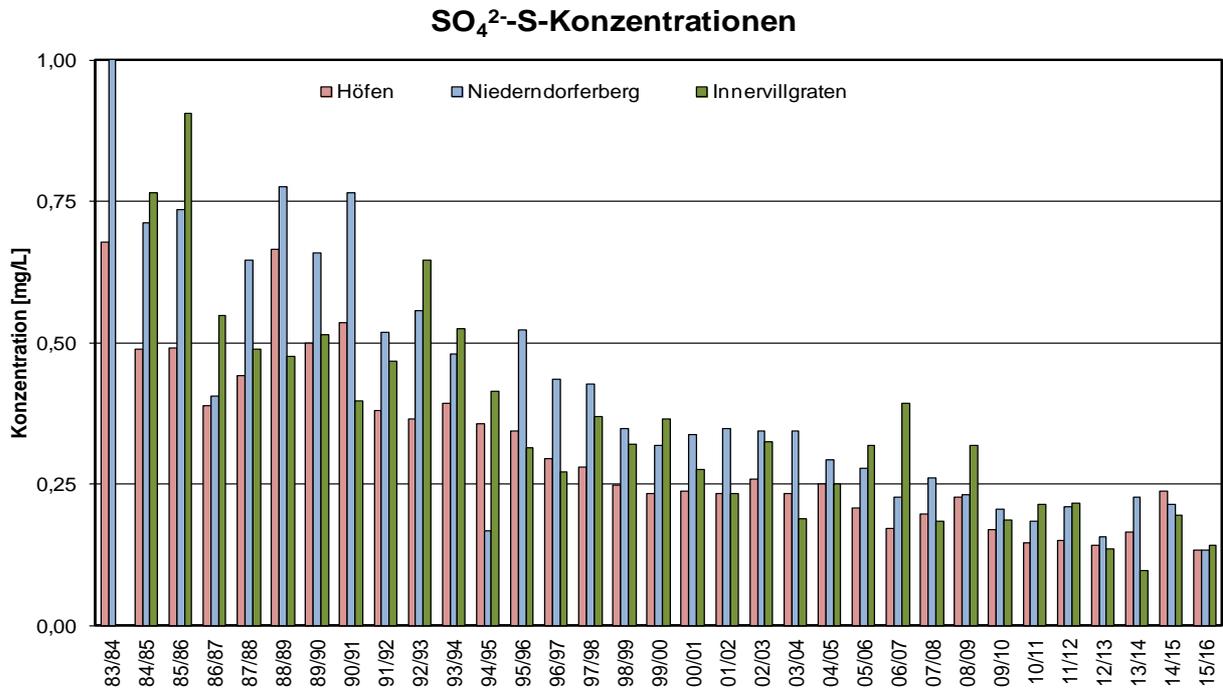


Abbildung 16: Jahresmittelwerte der Konzentration an Sulfat-Schwefel seit Beginn der Messungen.

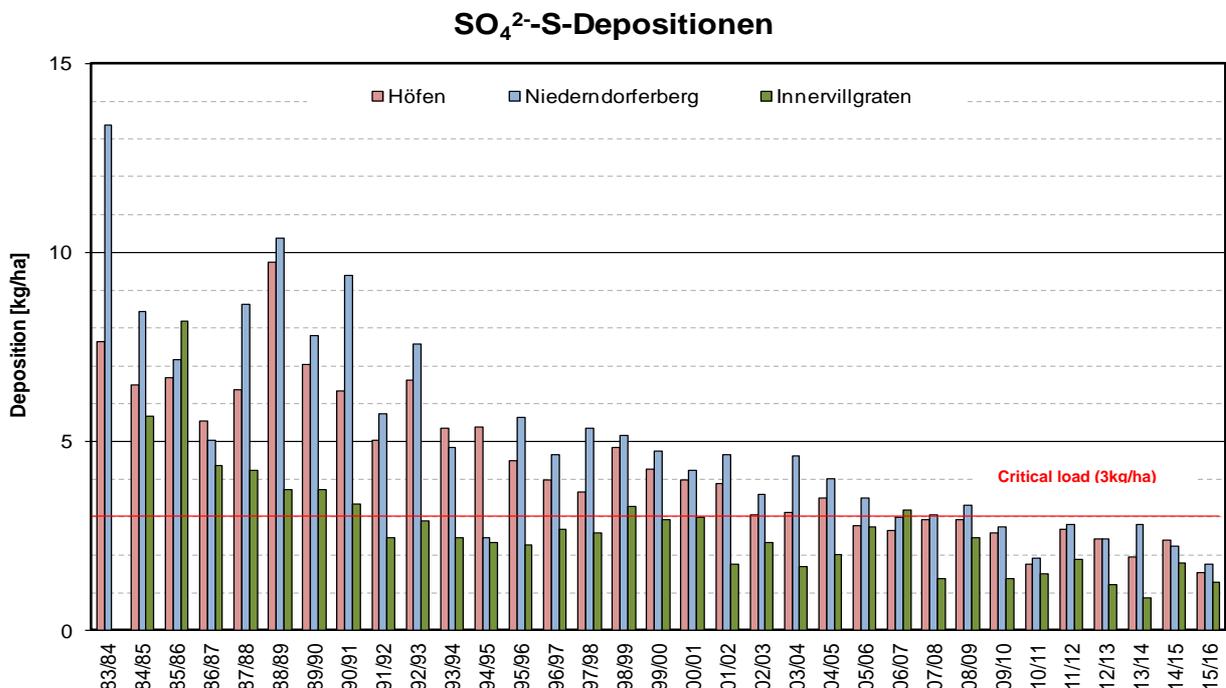
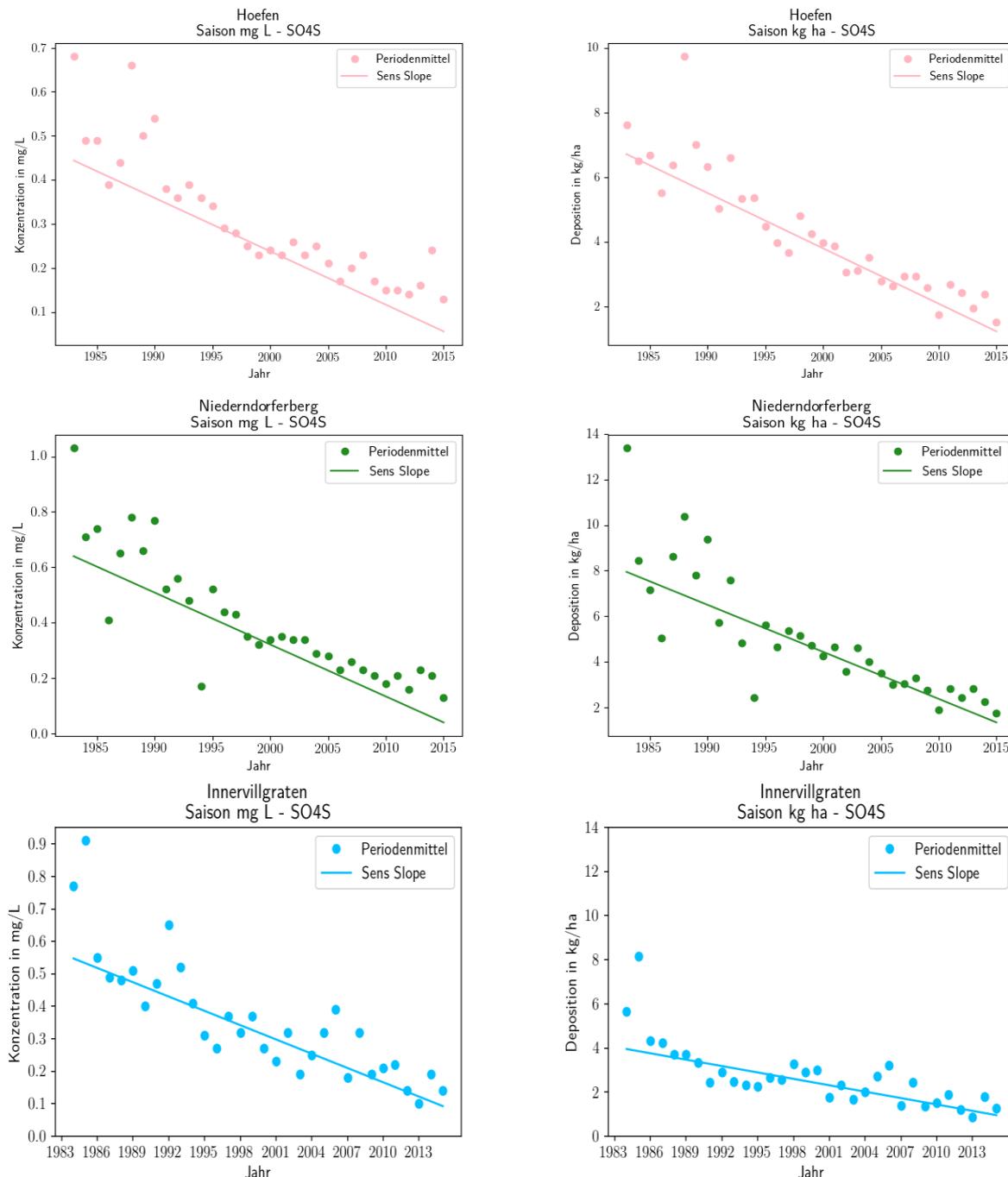


Abbildung 17: Einträge an Sulfat-Schwefel seit Beginn der Messungen an den drei Tiroler Messstellen.

Die Abnahmen der Konzentrations- und Depositionswerte für Sulfat-S sind an allen Messstellen signifikant ( $p < 0,05$ ; Abb. 18). Die Abnahme der Konzentrationswerte lag im gesamten Untersuchungszeitraum bei 0,4 mg/l (Höfen), 0,5 mg/l (Innevillgraten) und 0,6 mg/l (Niederndorferberg), was auch zu einer Verringerung der Depositionswerte um 3,1 kg/ha (Innevillgraten), 5,7 kg/ha (Höfen) und 6,8 kg/ha (Niederndorferberg) führte. Der Rückgang der Konzentrationswerte von Sulfat-S ermöglichte eine Erhöhung der pH-Werte in den Niederschlagsproben (vgl. 4.3.2).



**Abbildung 18:** Trendverläufe für die Konzentration und Deposition von Sulfat-S seit dem Beginn der Untersuchungen.

### 3.3.4 Entwicklung der Ammoniumkonzentration und der Ammoniumdeposition

In der aktuellen Untersuchungsperiode wurde der höchste Jahresmittelwert der Ammoniumkonzentration in Innervillgraten, der geringste in Höfen bestimmt (Abb. 19). Die Konzentrationsunterschiede zwischen den Messstellen sind im Vergleich zum Vorjahr wieder geringer. Generell zeigen die Werte von Jahr zu Jahr deutliche Unterschiede. Dies gilt speziell für die Station Innervillgraten.

Der Ammoniumeintrag zeigt geringere Unterschiede als der Verlauf der Konzentrationswerte. In der aktuellen Untersuchungsperiode ist die Deposition in Niederndorferberg am höchsten und in Höfen am geringsten (Abb. 20).

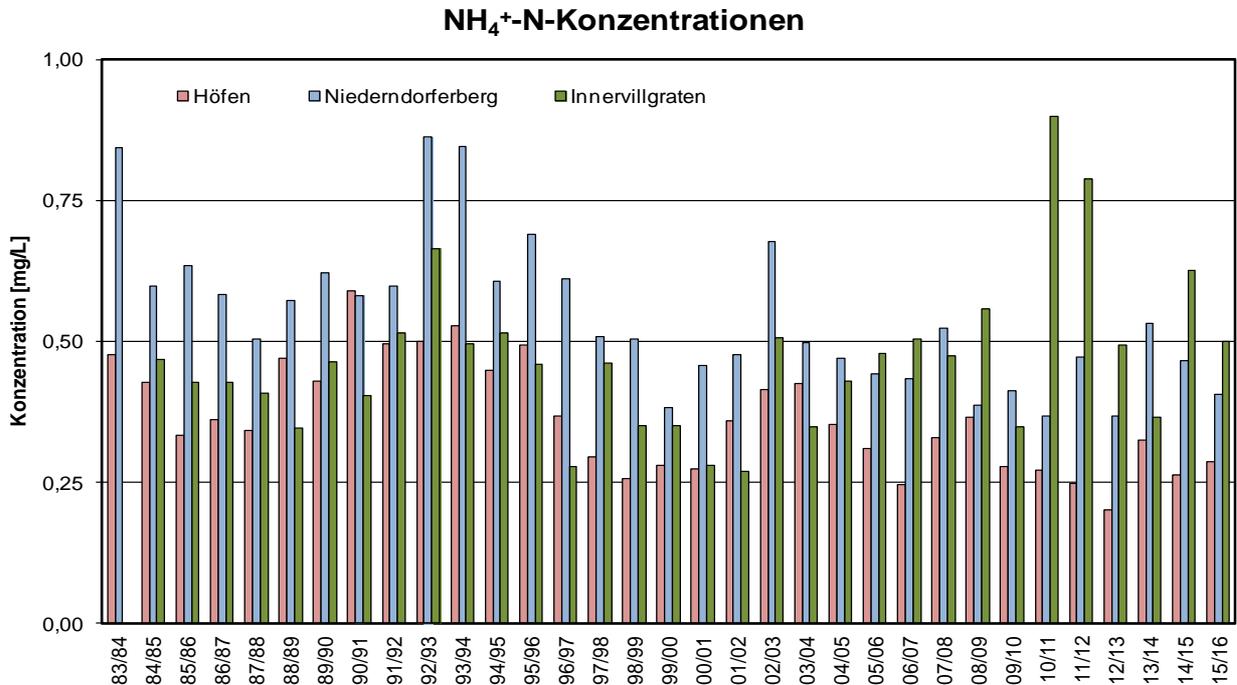


Abbildung 19: Jahresmittelwerte der Konzentration an Ammonium-Stickstoff seit Beginn der Messungen.

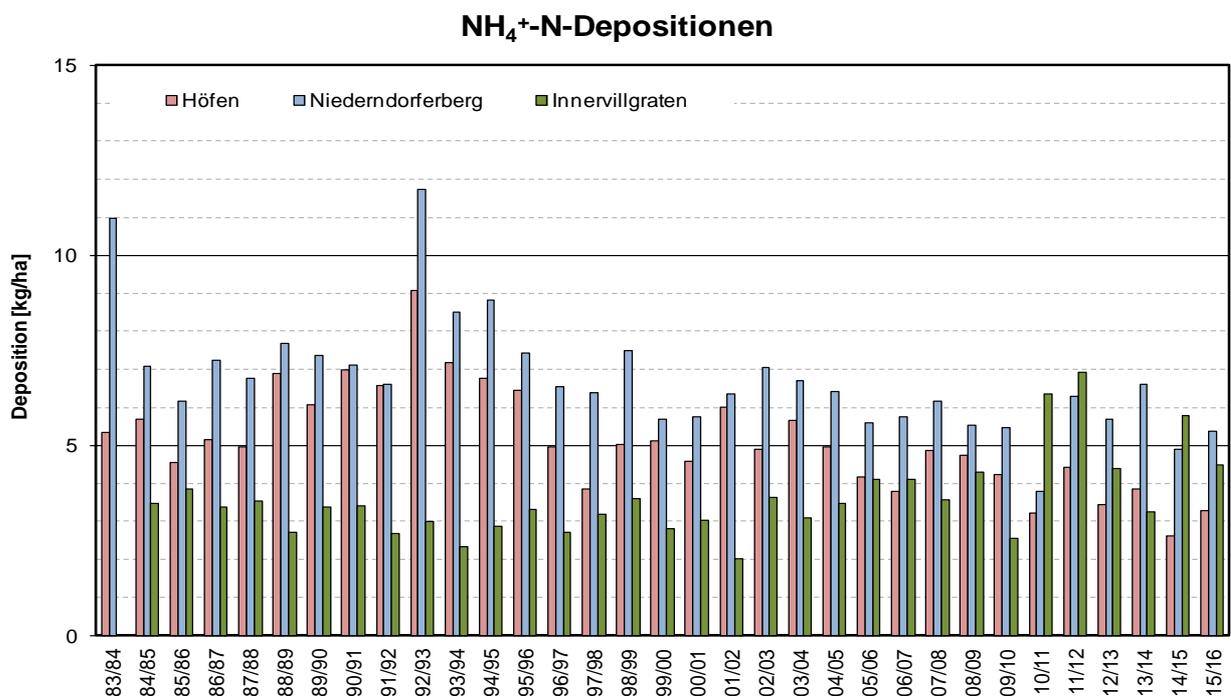
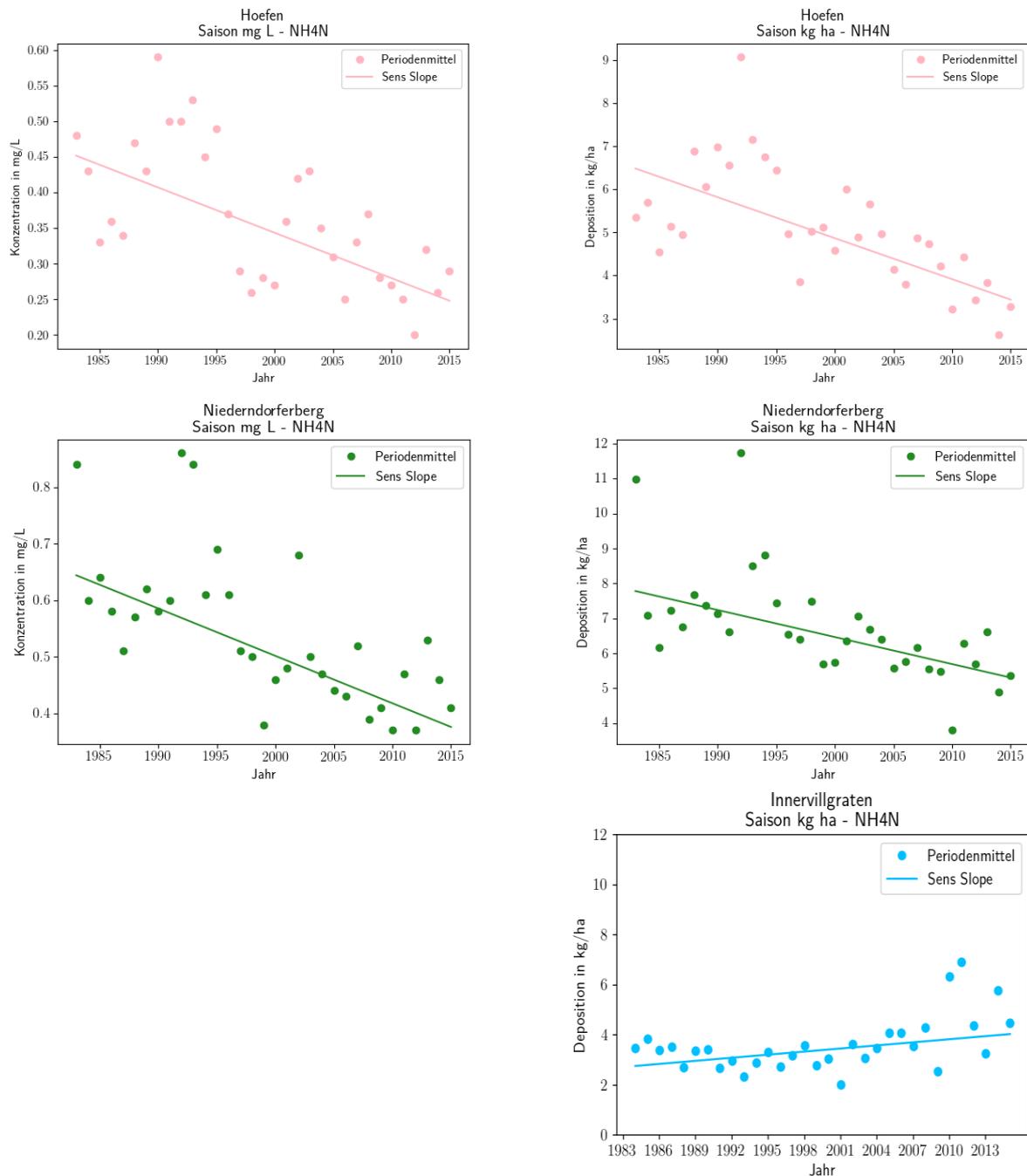


Abbildung 20: Einträge an Ammonium-Stickstoff seit Beginn der Messungen.

Seit Beginn der Untersuchungen sind für Höfen und Niederndorferberg signifikant fallende Trends sowohl für die Konzentrations- als auch für die Depositionswerte von Ammonium feststellbar (Abb. 21). Die Abnahme der Konzentrationswerte für  $\text{NH}_4^+$ -N liegt im Untersuchungszeitraum bei 0,2 mg/l in Höfen und 0,3 mg/l in Niederndorferberg. Berücksichtigt man auch die Niederschlagsmengen, so entspricht dies einer Abnahme der Depositionswerte um 3,1 kg/ha in Höfen und 2,6 kg/ha in Niederndorferberg. Für Innervillgraten ist kein statistisch signifikanter Trend der Konzentrationswerte zu erkennen, weshalb die Daten hier nicht dargestellt werden. Die Depositionswerte in Innervillgraten zeigen eine signifikante Zunahme, die im gesamten Beobachtungszeitraum 1,3 kg  $\text{NH}_4^+$ -N /ha beträgt. Diese Änderung ist offensichtlich auf eine geänderte landwirtschaftliche Nutzung der unmittelbaren Umgebung der Station zurückzuführen.



**Abbildung 21:** Trendverläufe für die Konzentration und Deposition von Ammonium-N seit dem Beginn der Untersuchungen.

### 3.3.5 Entwicklung der Nitratkonzentration und Nitratdeposition

Bezüglich der Konzentrationswerte werden in Niederndorferberg immer die höchsten, in Innervillgraten zumeist die geringsten Jahresmittelwerte für Nitrat-N bestimmt (Abb. 22). Vergleicht man die zeitliche Abfolge der einzelnen Periodenmittel, so treten deutlich geringere Schwankungen auf als bei Ammonium-N. In Innervillgraten werden immer die geringsten Einträge an Nitrat-Stickstoff bestimmt (Abb. 23). Die Unterschiede zwischen den drei Messpunkten in Tirol sind speziell in den letzten beiden Jahren weniger deutlich als zuvor.

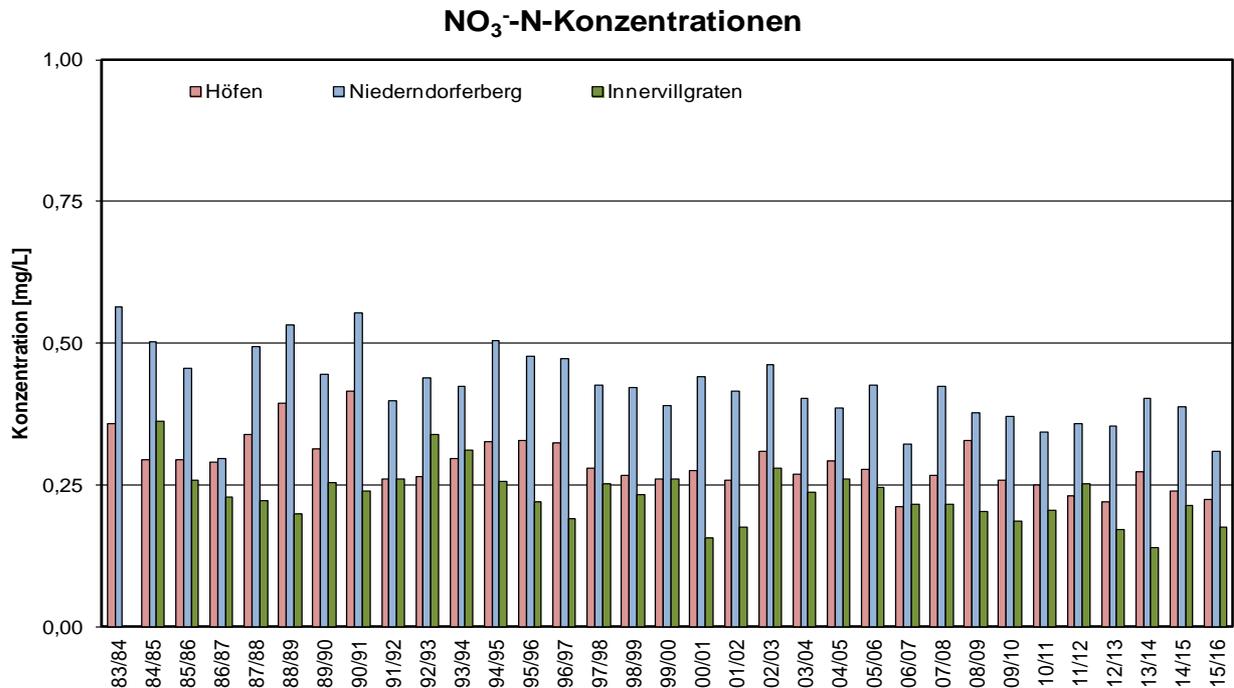


Abbildung 22: Jahresmittelwerte der Konzentration an Nitrat-Stickstoff seit Beginn der Messungen.

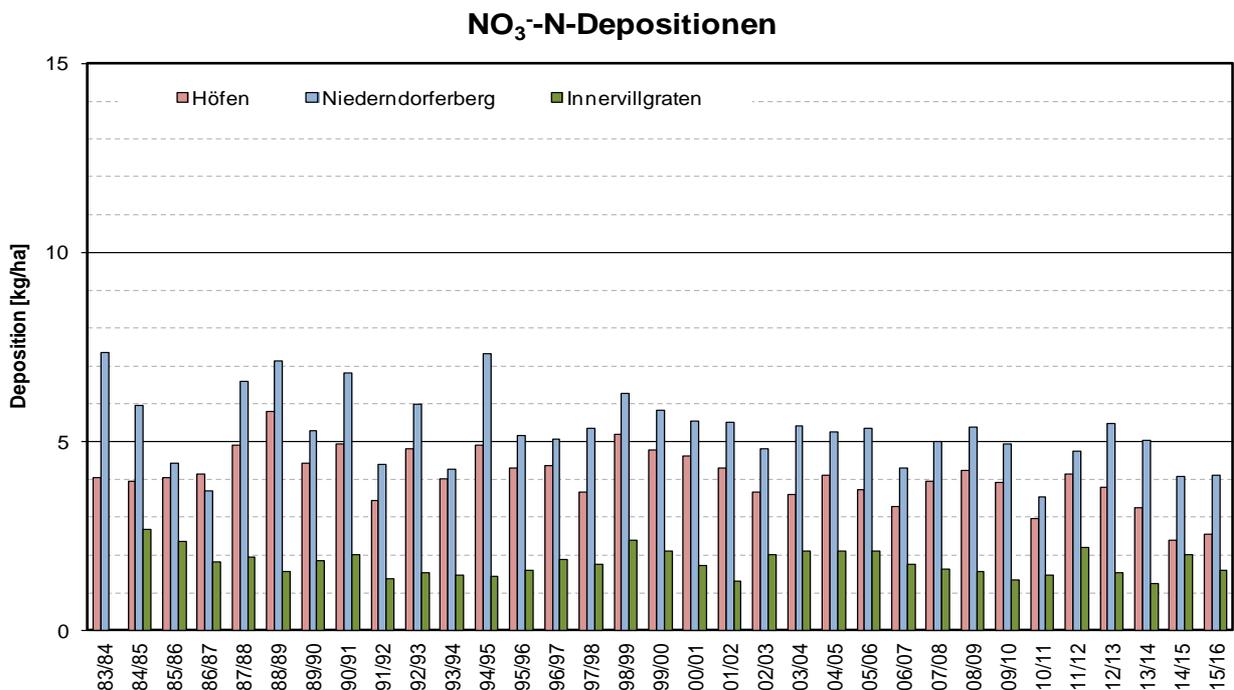
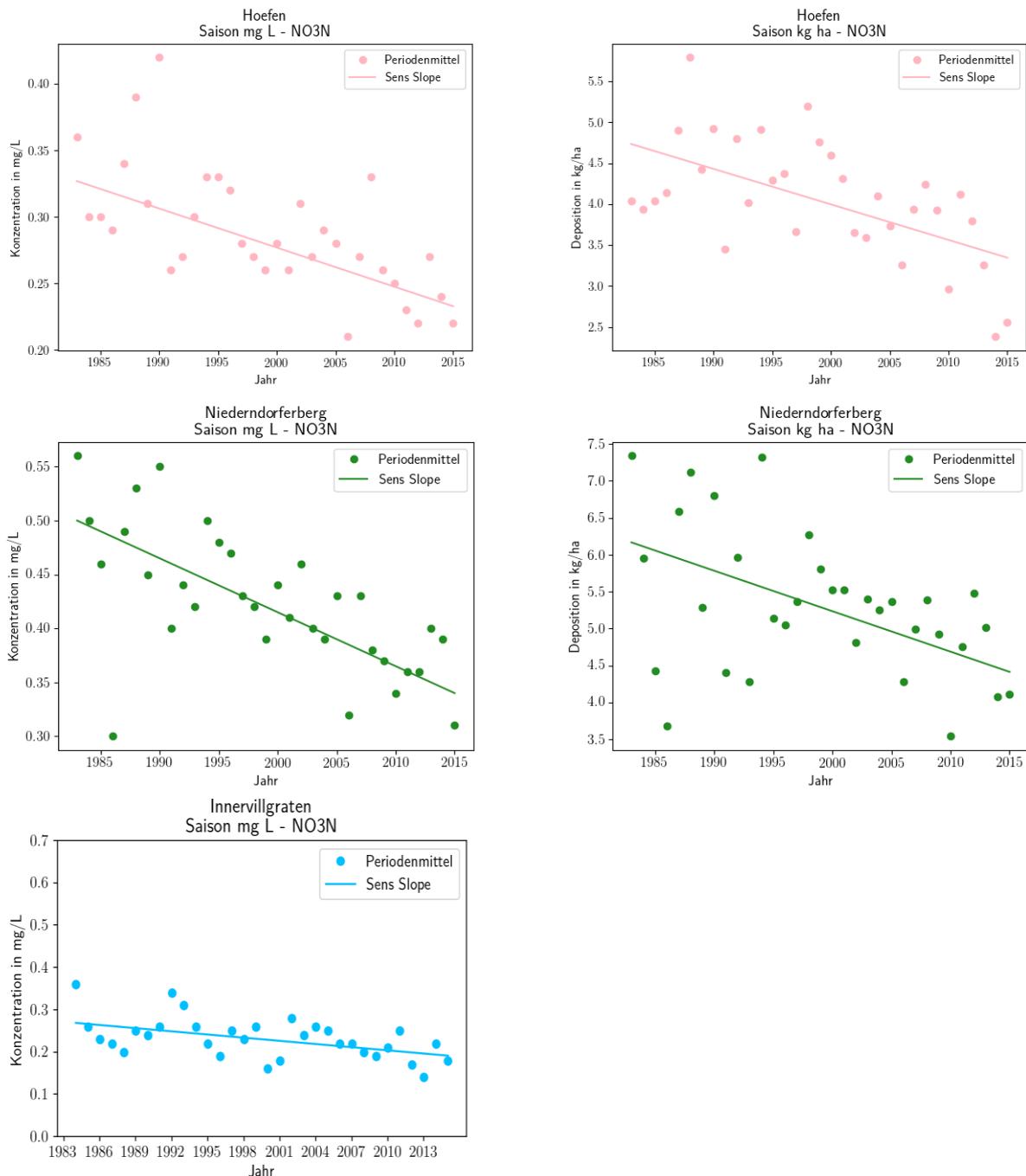


Abbildung 23: Einträge an Nitrat-Stickstoff seit Beginn der Messungen.

Für Nitrat-N konnte für alle Messstellen in Tirol ein signifikant fallender Trend der Konzentrationswerte bestimmt werden (Abb. 24). Die Abnahme über den gesamten Messzeitraum lag in Höfen und Innervillgraten bei 0,1 mg/l, in Niederndorferberg bei 0,2 mg/l. Für die Deposition konnte nur für Höfen und Niederndorferberg ein fallender Trend festgestellt werden. Hier beträgt die Abnahme über den gesamten Untersuchungszeitraum in Höfen 1,4 kg/ha und in Niederndorferberg 1,8 kg/ha. In Innervillgraten ist hingegen für die Deposition kein signifikanter Trend bestimmbar, daher werden die Daten hier nicht dargestellt.



**Abbildung 24:** Trendverläufe für die Konzentration und Deposition von Nitrat-N seit dem Beginn der Untersuchungen.

### 3.3.6 Entwicklung der Gesamtstickstoff-Konzentration und des Gesamtstickstoffeintrags

Die Gesamtstickstoff-Konzentration ist die Summe aus der Ammonium- und Nitrat-Konzentration und wurde besonders in den letzten Jahren von der Ammoniumkonzentration geprägt. Bis auf die Untersuchungsperioden 2010/11 und 2011/12 (hohe Ammoniumkonzentrationen in Innervillgraten) waren die Konzentrationen in Niederndorferberg am höchsten. Im aktuellen Berichtszeitraum sind die Konzentrationswerte für Niederndorferberg und Innervillgraten beinahe gleich (Abb. 25).

Der Gesamtstickstoffeintrag ( $N_{gesamt}$ ) stellt eine aus ökologischer Sicht wichtige Kenngröße dar. Die höchsten N-Einträge in Tirol wurden meist in Niederndorferberg bestimmt (Abb. 26 und Tabelle 11). In der aktuellen Saison liegt der Gesamtstickstoffeintrag durch die nasse Deposition zwischen 6 und 10 kg/ha und Jahr. In der Literatur sind Richtwerte für kritische Gesamtstickstoffeinträge (Critical Loads) in empfindliche Ökosysteme definiert (WHO 1995, Nagel und Gregor 1999). Stickstoffeinträge über 10 kg/ha/Jahr werden gemäß dem Critical Load-Konzept als deutliche Belastung eingestuft, die zu negativen Veränderungen in nährstoffarmen Ökosystemen führen.

Zur Beschreibung der Gesamtdeposition in ein Ökosystem sind neben der nassen Deposition (Eintrag durch Regen und Schnee) auch die Eintragswege über die trockene Deposition (direkter Eintrag reaktiver Gase bzw. Partikel) und über die okkulte Deposition (Interzeption von Nebelwasser) zu berücksichtigen. Der gesamte Eintrag an eutrophierendem (reaktiven) Stickstoff kann daher wesentlich höher sein als hier gemessen. In der Vergangenheit wurden umfassende Untersuchungen zur Darstellung der relativen Beiträge aus nasser, trockener und okkultur Deposition in Tirol durchgeführt (z.B. Kalina et al. 2002), die diese Tatsache unterstreichen. Besondere Beachtung verdient der Nordalpenraum, wo erhöhte N-Einträge besonders Nährstoffungleichgewichte und die Destabilisierung von Waldökosystemen fördern. Im Grünland sind derartige Nährstoffungleichgewichte aufgrund der schnelleren Anpassung der Vegetation (insbesondere bei Gräsern) von geringerer Bedeutung, jedoch aber für die Vegetation in nährstoffarmen Feuchtfleichen oder Trockenrasen.

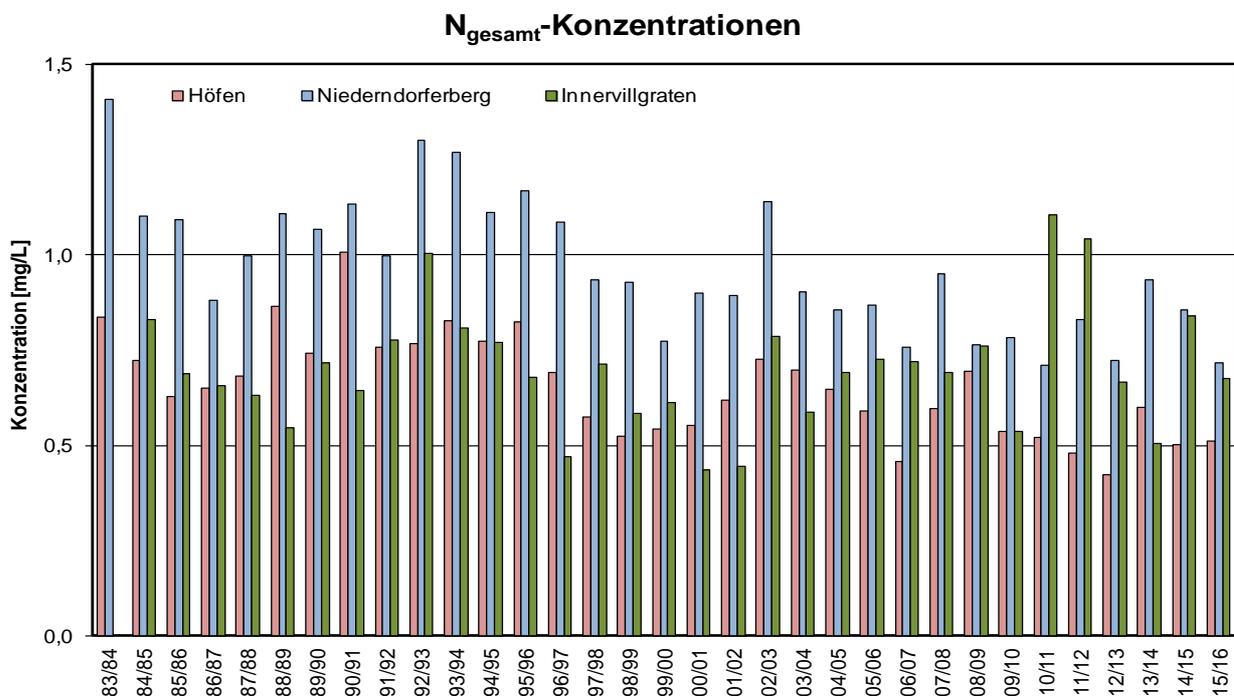


Abbildung 25: Jahresmittelwerte der Konzentration an Gesamtstickstoff seit Beginn der Messungen.

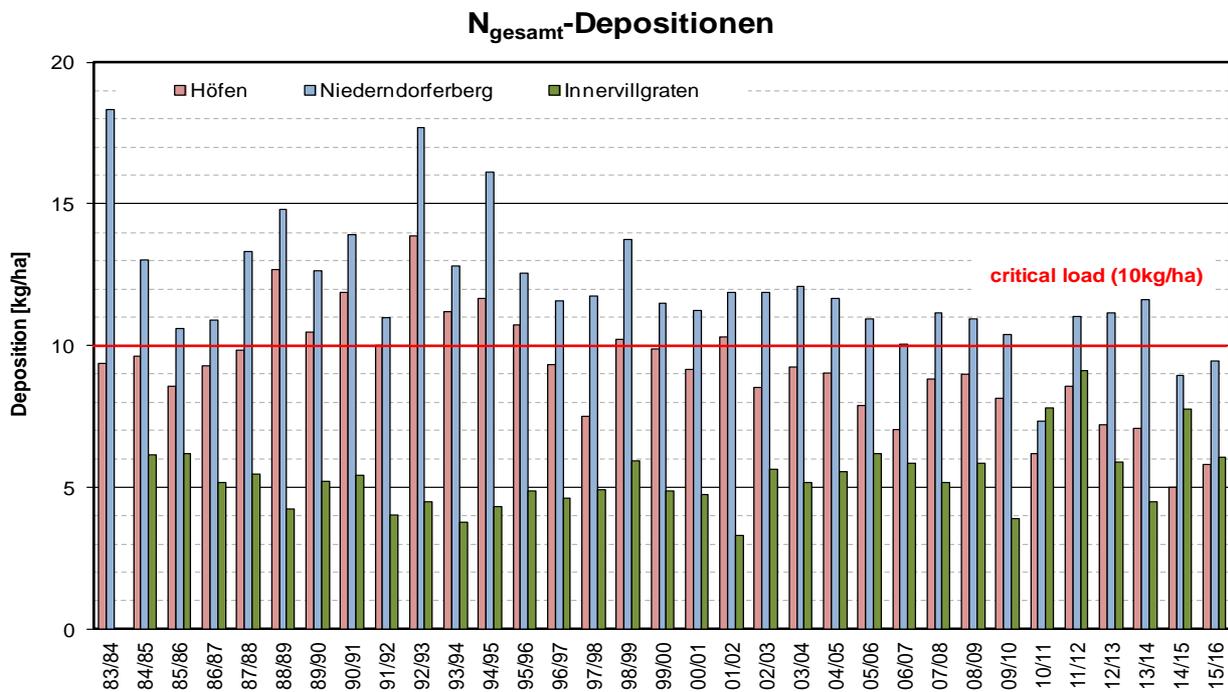


Abbildung 26: Eintrag an Gesamtstickstoff seit Beginn der Messungen.

Für Gesamtstickstoff werden nur für die Depositionswerte in Höfen und Niederndorferberg signifikante Trends festgestellt. Im gesamten Beobachtungszeitraum ist an beiden Stationen eine Abnahme zu verzeichnen. Diese liegt in in Höfen bei 4,8 kg/ha und in Niederndorferberg bei 4,0 kg/ha (Abb. 27).

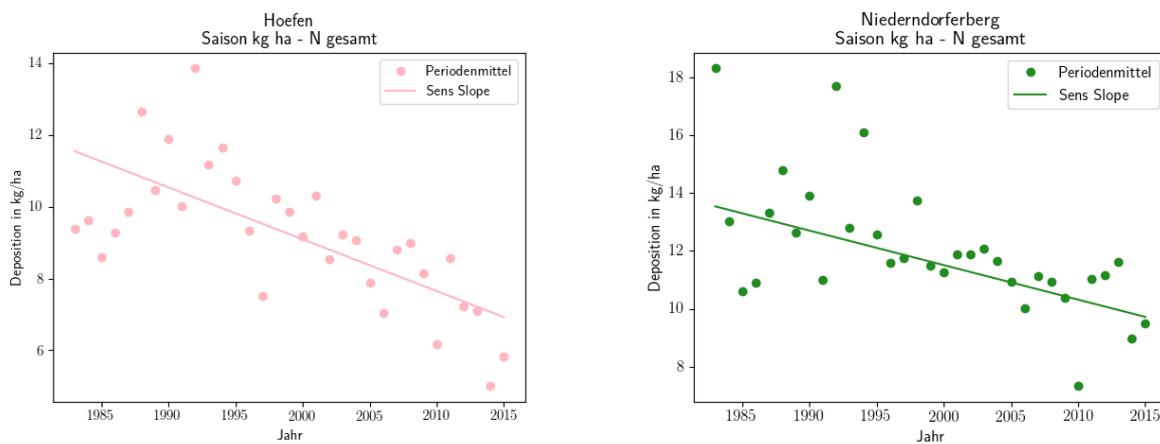


Abbildung 27: Trendverläufe für die nasse Deposition von Gesamt-N seit Beginn der Messungen.

**Tabelle 11:** Stickstoffeinträge durch nasse Deposition ( $\text{NH}_4^+\text{-N} + \text{NO}_3^-\text{-N}$ ) an den Stationen im Untersuchungsgebiet zusammen mit Critical Loads für den Gesamtstickstoffeintrag ( $\text{N}_{\text{gesamt}}$ ).

Untersuchungs- periode	Stickstoffeintrag [kg/ha.a] (nasse Deposition von $\text{NH}_4^+\text{-N} + \text{NO}_3^-\text{-N}$ )		
	Höfen	Niederndorferberg	Innevillgraten
1983/84	9,0	17,3	
1984/85	9,6	13,0	6,1
1985/86	8,6	10,6	6,2
1986/87	9,3	10,9	5,2
1887/88	9,9	13,3	5,5
1988/89	12,7	14,8	4,3
1989/90	10,5	12,6	5,2
1990/91	11,9	13,9	5,4
1991/92	10,0	11,0	4,0
1992/93	13,9	15,6	4,5
1993/94	11,2	12,8	3,8
1994/95	11,7	16,1	4,3
1995/96	10,7	12,6	4,7
1996/97	9,3	11,6	4,6
1997/98	7,5	11,8	4,9
1998/99	10,2	13,8	6,0
1999/00	9,9	11,5	4,9
2000/01	9,2	11,3	4,7
2001/02	10,3	11,9	3,3
2002/03	8,5	11,9	5,6
2003/04	9,2	12,1	5,2
2004/05	9,2	11,8	5,6
2005/06	7,9	10,9	6,2
2006/07	7,1	10,0	5,9
2007/08	8,8	11,1	5,2
2008/09	9,0	10,9	5,9
2009/10	8,1	10,4	3,9
2010/11	6,1	7,3	7,8
2011/12	8,6	11,0	9,1
2012/13	7,2	11,2	5,9
2013/14	(7,1)*	11,6	4,5
2014/15	5,0	9,0	7,8
2015/16	5,8	9,5	6,1
<b>Critical Loads für <math>\text{N}_{\text{gesamt}}</math></b>	<b>10 kg/ha.a</b> (WHO 1995)		

\* Die Werte in Klammern stammen von unvollständigen Untersuchungsperioden und sind als unterer Schätzwert anzusehen.

### 3.4 Vergleich der Tiroler Messstellen mit Ergebnissen aus den anderen Bundesländern

In der Folge werden die Ergebnisse der Untersuchungen zur nassen Deposition in Tirol mit den Ergebnissen aus den Bundesländern Steiermark, Niederösterreich und Salzburg verglichen. Dies erfolgt auf Basis der für den Untersuchungszeitraum Oktober 2015 bis September 2016 berechneten Jahresmittelwerte der Ionenkonzentrationen und der Jahresdeposition für Schwefel- und Stickstoffkomponenten. In Tabelle 12 sind die Konzentrationsmittelwerte in mg/L, in Tabelle 13 die jährlichen Depositionssummen in kg/ha angegeben. Die räumliche Verteilung der mengengewichteten Jahreskonzentrationen im Niederschlag sowie der Einträge an Sulfat-Schwefel, Ammonium-Stickstoff und Nitrat-Stickstoff ist darüberhinaus in den Abbildungen 28 bis 33 dargestellt. Dabei stellen die linken Balken einen Mittelwert über die letzten 5 Saisonen an diesem Messstandort dar, die rechten Balken entsprechen den Werten der Saison 2015/16. Daraus ist ersichtlich, wie sich die Konzentrationen und Depositionen im letzten Jahr entwickelt haben.

Bei der räumlichen Verteilung der Ionenkonzentrationen ist für Sulfat und weniger deutlich auch für Nitrat ein West-Ost-Gradient zu bemerken. Die Ionenkonzentrationen im Niederschlagswasser sind im Westen Österreichs geringer als im Osten. Ein weiterer Unterschied besteht zwischen den Stationen im inneralpinen Raum und den Stationen nördlich und östlich der Alpen. In inneralpinen Gebieten sind die Ionenkonzentrationen eher geringer als im Alpenvorland. Die Station Innervillgraten gehört zu diesem inneralpinen Typus. Diese Gradienten wurden bei Puxbaum et al. (1991) im Vergleich mit den Stationen Höfen, Niederndorferberg und Haunsberg mit Daten aus den Jahren 1987/88 und 1988/89 aufgezeigt und können in der vorliegenden Periode auch erkannt werden. Für Ammonium treffen diese Trends nicht zu. Hier kann es, offensichtlich durch die stärkere lokale Beeinflussung, von Jahr zu Jahr zu geänderten Verteilungsmustern kommen.

Der durch Niederschläge deponierte Eintrag ist sowohl von der Konzentration an Ionen im Niederschlagswasser als auch von der Niederschlagsmenge abhängig. Da die Niederschlagsmengen am Rande der Alpen verhältnismäßig hoch sind, verändern sich die für die Konzentrationswerte erkennbaren Gradienten. Sie werden abgeschwächt oder sogar aufgehoben. Der Einfluss der Niederschlagsmenge zeigt sich beispielsweise beim Vergleich der Messstellen Innervillgraten (898 mm Niederschlag) mit den Messstellen Niederndorferberg (1324 mm Niederschlag) oder Lunz (Niederösterreich, 1615 mm Niederschlag).

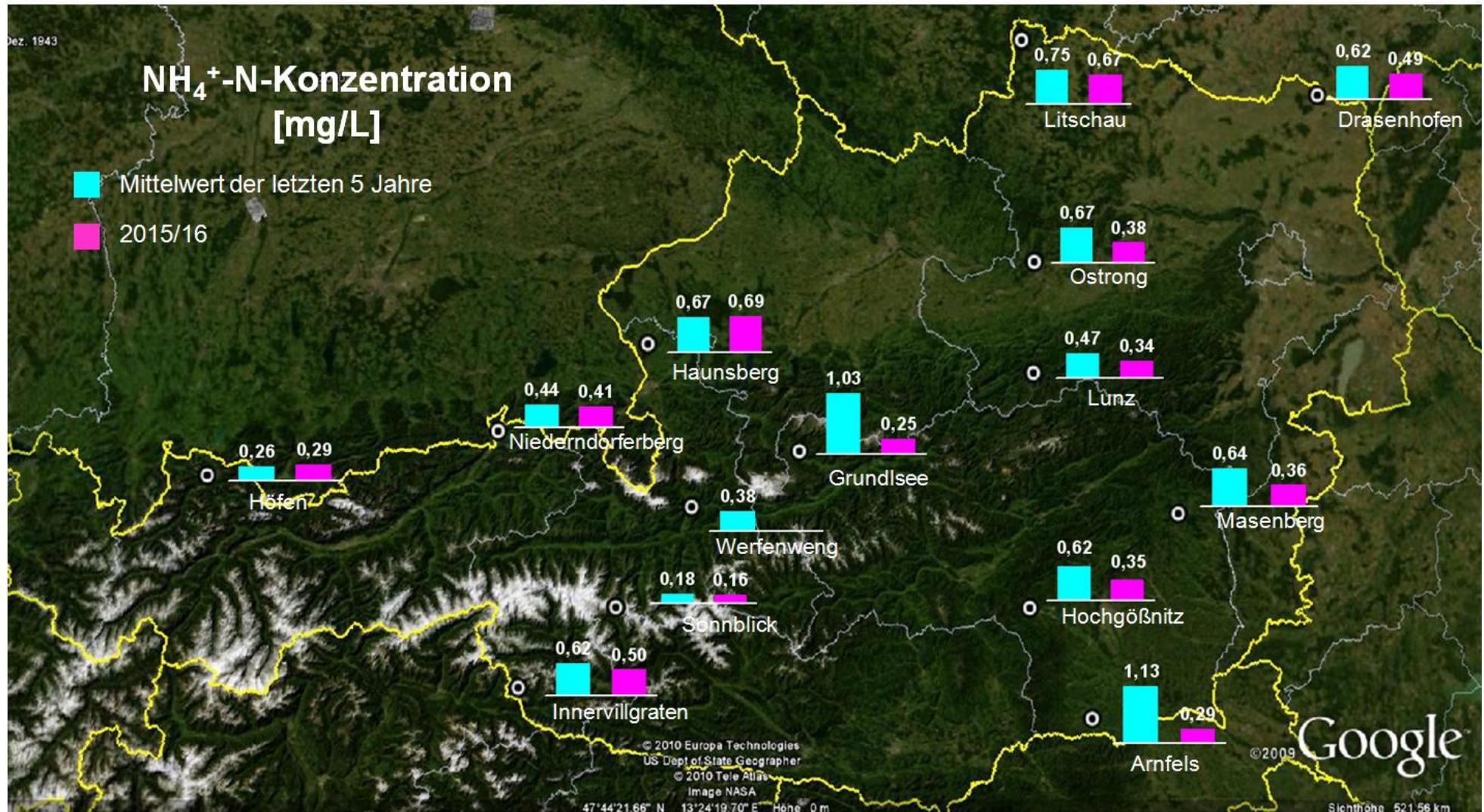
Durch nasse Deposition wurden im Untersuchungsjahr 2015/16 an den Messstellen in Nordtirol 2 kg Schwefel und 6 bis 10 kg Stickstoff pro Hektar eingetragen. An der inneralpinen Messstelle Innervillgraten betrug der Eintrag 1 kg Schwefel und 6 kg Stickstoff pro Hektar. Im Vergleich dazu variieren die Einträge in den Bundesländern Steiermark, Salzburg und Niederösterreich zwischen 1 und 3 kg Schwefel pro Hektar und 5 und 11 kg Stickstoff pro Hektar.

**Tabelle 12:** Bundesländervergleich der am Institut für CTA der TU Wien ausgewerteten mengengewichteten Jahresmittelwerte der Konzentration an Niederschlagsinhaltsstoffen für den Zeitraum 01.10.2015 bis 30.09.2016 (in mg/L); \*Aufgrund eines mehrmonatigen Datenausfalls wurden für Werfenweng in der Saison 2015-16 keine Jahresmittelwerte berechnet.

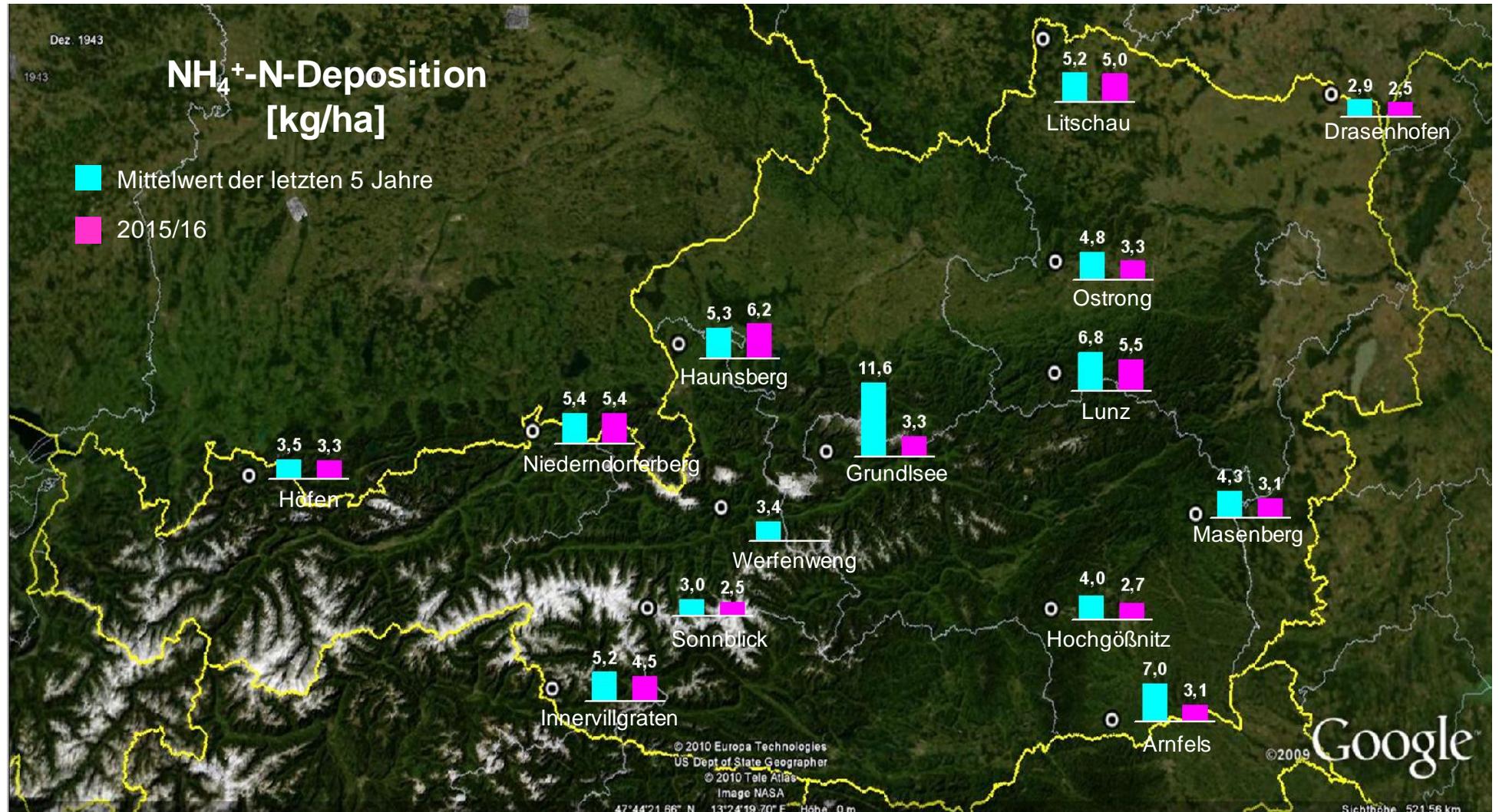
Station	NS	pH	H <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N	K <sup>+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2</sup>	Cl <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> -S
	[mm]	[-]					[mg/L]				
<b>Tirol:</b>											
Höfen	1137,6	5,9	0,001	0,07	0,29	0,05	0,38	0,10	0,13	0,22	0,13
Niederndorferberg	1323,6	5,4	0,004	0,09	0,41	0,06	0,13	0,02	0,13	0,31	0,13
Innervillgraten	898,1	5,8	0,001	0,07	0,50	0,12	0,24	0,04	0,13	0,18	0,14
<b>Salzburg:</b>											
Haunsberg	904,7	5,9	0,001	0,27	0,69	0,17	0,50	0,09	0,32	0,45	0,28
Werfenweng*	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Sonnblick	1570,2	5,3	0,005	0,08	0,16	0,03	0,16	0,02	0,08	0,14	0,09
<b>Niederösterreich:</b>											
Litschau	747,9	4,8	0,016	0,24	0,67	0,23	0,40	0,08	0,20	0,73	0,37
Lunz	1615,2	5,1	0,007	0,10	0,34	0,04	0,17	0,03	0,14	0,33	0,19
Ostrong	872,7	5,2	0,006	0,09	0,38	0,12	0,37	0,06	0,12	0,35	0,29
Drasenhofen	515,6	5,2	0,006	0,16	0,49	0,06	0,69	0,08	0,34	0,51	0,50
<b>Steiermark:</b>											
Arnfels	1050,4	5,1	0,007	0,08	0,29	0,05	0,29	0,04	0,13	0,26	0,30
Grundlsee	1285,7	5,5	0,003	0,08	0,25	0,04	0,28	0,02	0,16	0,22	0,13
Hochgößnitz	793,1	5,3	0,005	0,06	0,35	0,03	0,24	0,02	0,11	0,25	0,26
Masenberg	851,4	5,4	0,004	0,07	0,36	0,05	0,27	0,04	0,11	0,24	0,24

**Tabelle 13:** Bundesländervergleich der am Institut für CTA der TU Wien ausgewerteten Jahreseinträge der Niederschlagsinhaltsstoffe (nasse Deposition) für den Zeitraum 01.10.2015 bis 30.09.2016 (in kg/ha); \*Aufgrund eines mehrmonatigen Datenausfalls wurden für Werfenweng in der Saison 2015-16 keine Jahreseinträge bestimmt.

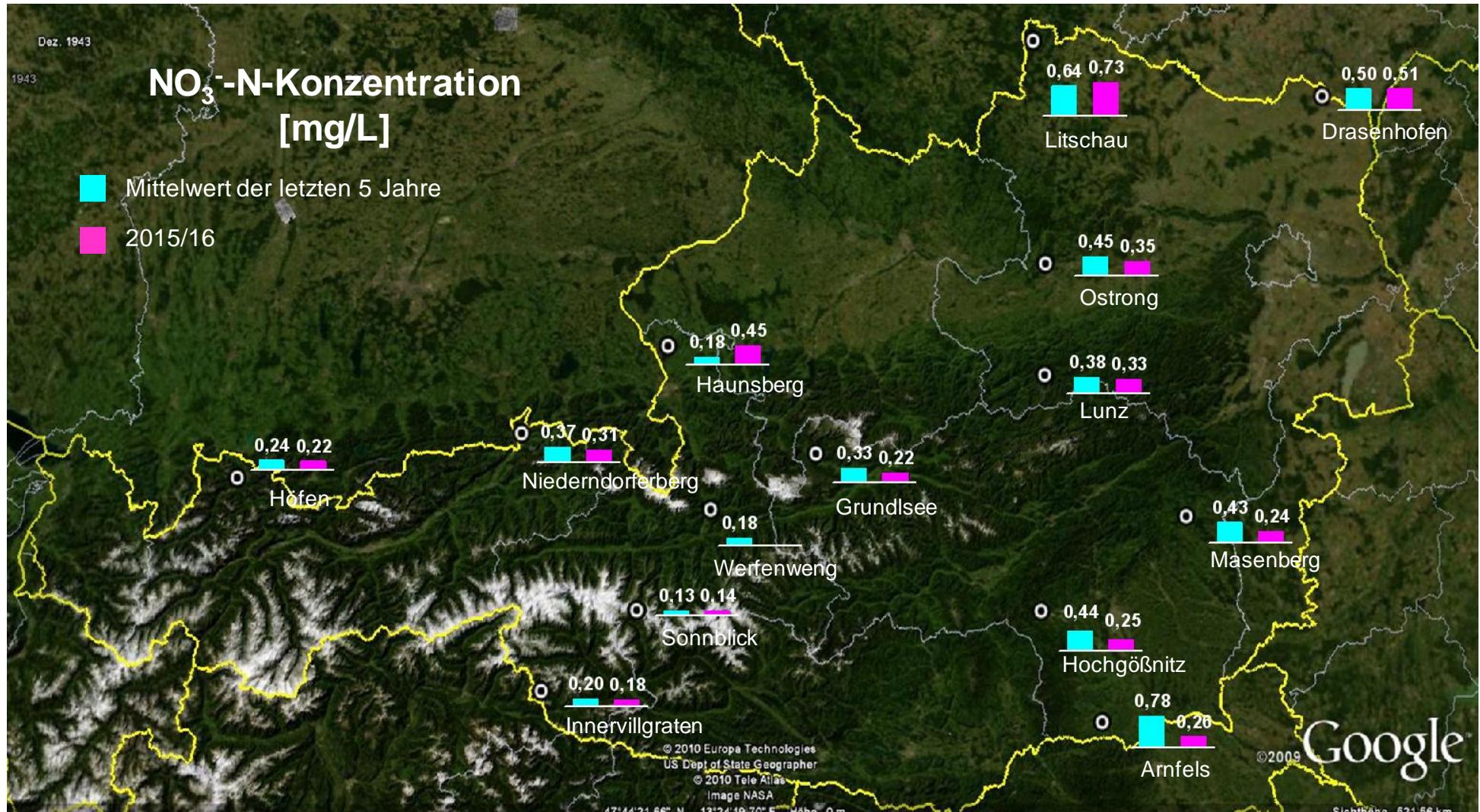
Station	NS	pH	H <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N	K <sup>+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2</sup>	Cl <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> -S
	[mm]	[-]					[kg/ha]				
<b>Tirol:</b>											
Höfen	1137,6	5,9	0,013	0,83	3,27	0,52	4,33	1,09	1,52	2,56	1,51
Niederndorferberg	1323,6	5,4	0,051	1,17	5,37	0,74	1,74	0,28	1,71	4,11	1,75
Innervillgraten	898,1	5,8	0,013	0,63	4,48	1,09	2,14	0,36	1,16	1,58	1,28
<b>Salzburg:</b>											
Haunsberg	904,7	5,9	0,011	2,44	6,22	1,50	4,52	0,86	2,91	4,03	2,57
Werfenweng*	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Sonnblick	1570,2	5,3	0,075	1,26	2,47	0,43	2,56	0,28	1,25	2,17	1,35
<b>Niederösterreich:</b>											
Litschau	747,9	4,8	0,123	1,81	5,00	1,75	2,98	0,63	1,46	5,49	2,75
Lunz	1615,2	5,1	0,117	1,60	5,52	0,60	2,71	0,42	2,24	5,27	2,99
Ostrong	872,7	5,2	0,052	0,82	3,31	1,08	3,26	0,51	1,06	3,01	2,55
Drasenhofen	515,6	5,2	0,031	0,84	2,53	0,32	3,54	0,40	1,76	2,61	2,60
<b>Steiermark:</b>											
Amfels	1050,4	5,1	0,075	0,80	3,09	0,55	3,02	0,39	1,34	2,75	3,16
Grundlsee	1285,7	5,5	0,040	1,08	3,26	0,48	3,59	0,29	2,02	2,77	1,70
Hochgößnitz	793,1	5,3	0,041	0,44	2,74	0,25	1,89	0,19	0,85	1,98	2,09
Masenberg	851,4	5,4	0,035	0,57	3,08	0,45	2,28	0,30	0,95	2,04	2,04



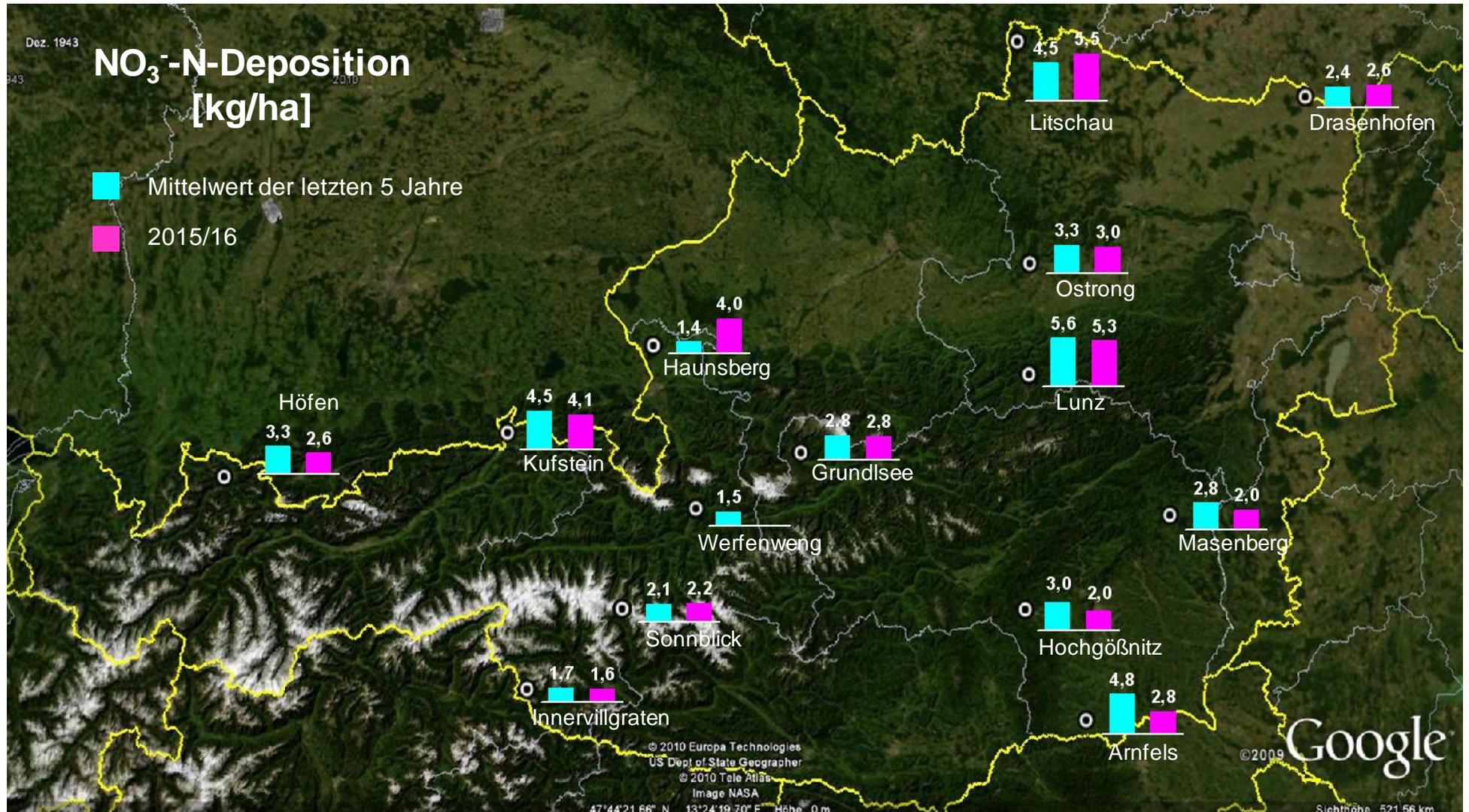
**Abbildung 28:** Räumliche Verteilung der mengengewichteten NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N Jahreskonzentrationen für den Zeitraum Oktober 2015 bis September 2016 im Vergleich mit dem Mittelwert der letzten 5 Jahre. Aufgrund eines mehrmonatigen Datenausfalls wurden für Werfenweng keine Jahreswerte ermittelt.



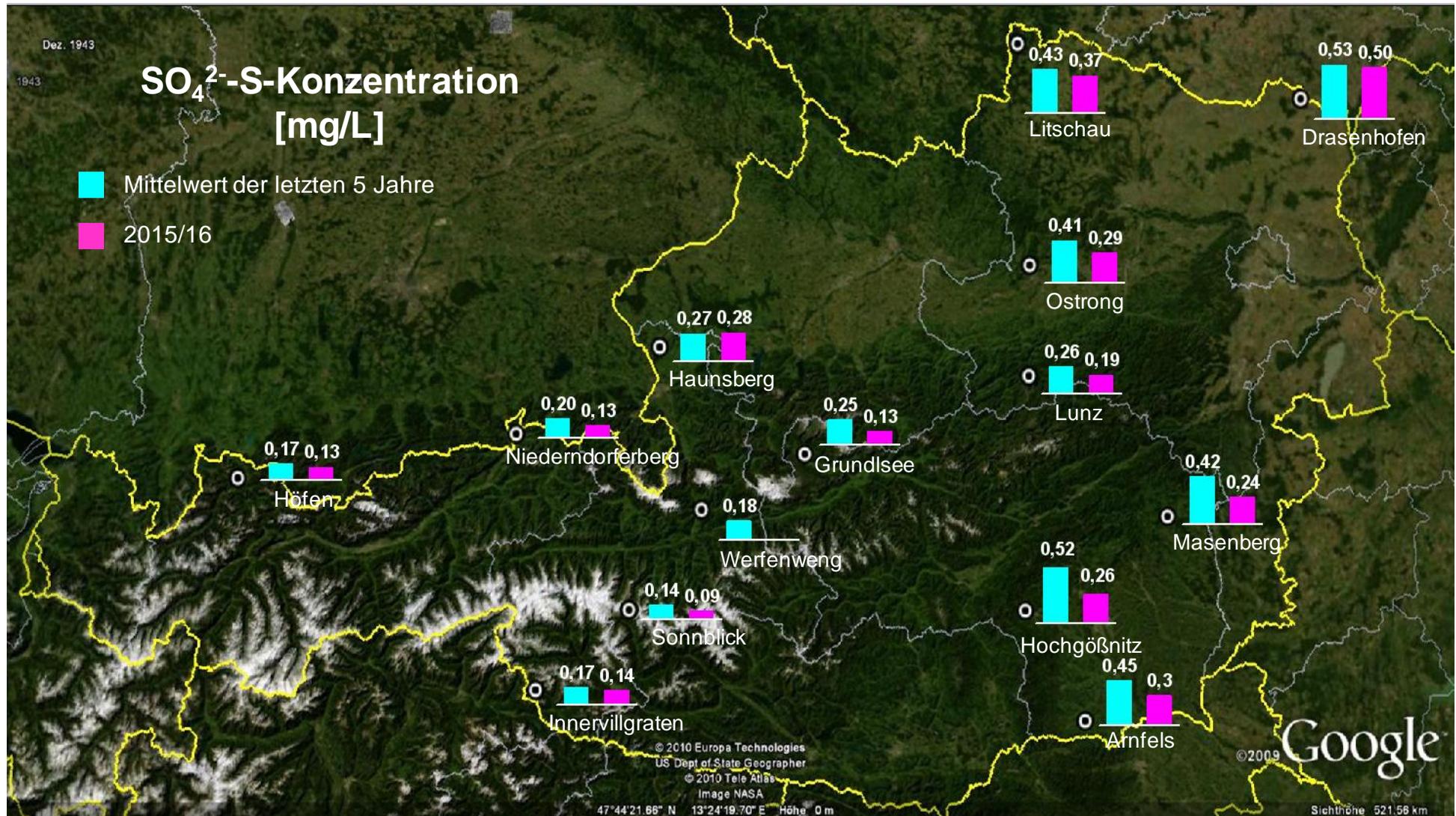
**Abbildung 29:** Räumliche Verteilung der NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N Jahreseinträge für den Zeitraum Oktober 2015 bis September 2016 im Vergleich mit dem Mittelwert der letzten 5 Jahre. Aufgrund eines mehrmonatigen Datenausfalls wurden für Werfenweng keine Jahreswerte ermittelt.



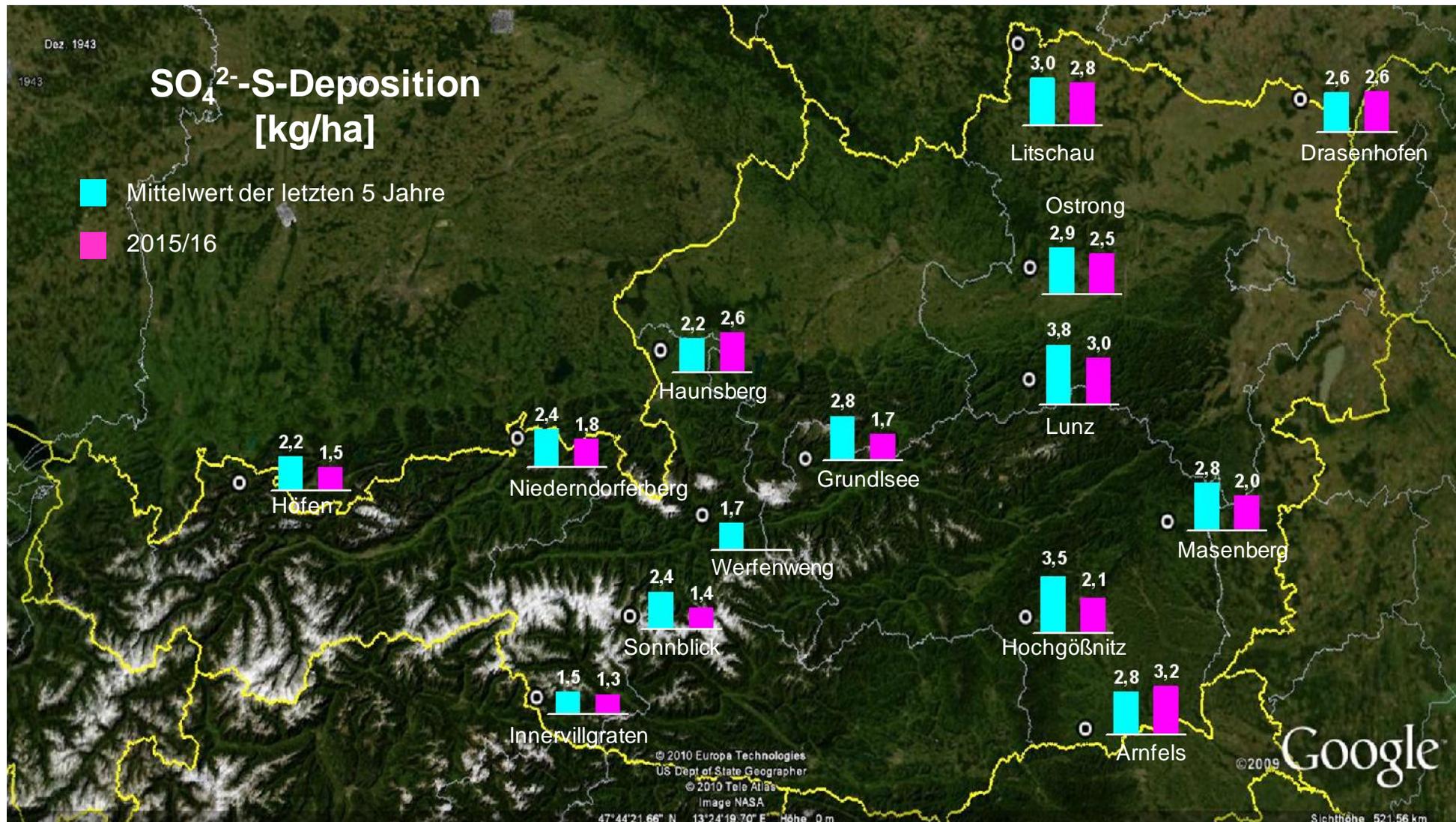
**Abbildung 30:** Räumliche Verteilung der mengengewichteten NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N Jahreskonzentrationen im Niederschlag für den Zeitraum Oktober 2015 bis September 2016 im Vergleich mit dem Mittelwert der letzten 5 Jahre. Aufgrund eines mehrmonatigen Datenausfalls wurden für Werfenweng keine Jahreswerte ermittelt.



**Abbildung 31:** Räumliche Verteilung der NO<sub>3</sub>-N Jahreseinträge für den Zeitraum Oktober 2015 bis September 2016 im Vergleich mit dem Mittelwert der letzten 5 Jahre. Aufgrund eines mehrmonatigen Datenausfalls wurden für Werfenweng keine Jahreswerte berechnet.



**Abbildung 32:** Räumliche Verteilung der mengengewichteten SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>-S Jahreskonzentrationen im Niederschlag für den Zeitraum Oktober 2015 bis September 2016 im Vergleich mit dem Mittelwert der letzten 5 Jahre. Aufgrund eines mehrmonatigen Datenausfalls wurden für Werfenweng keine Jahreswerte ermittelt.



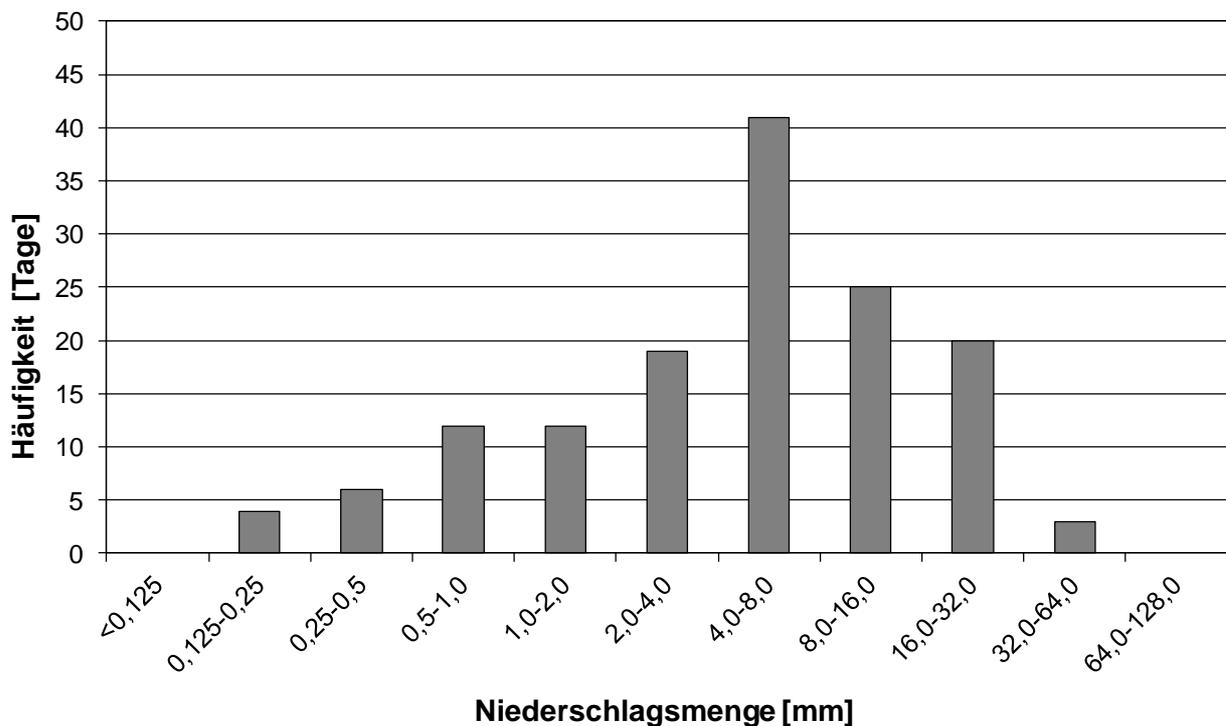
**Abbildung 33:** Räumliche Verteilung der SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>-S Jahreseinträge für den Zeitraum Oktober 2015 bis September 2016 im Vergleich mit dem Mittelwert der letzten 5 Jahre. Aufgrund eines mehrmonatigen Datenausfalls wurden für Werfenweng keine Jahreswerte ermittelt.

### 3.5. Zusammenhang zwischen den Niederschlagsmengen und den Stoffkonzentrationen bzw. Stoffeinträgen

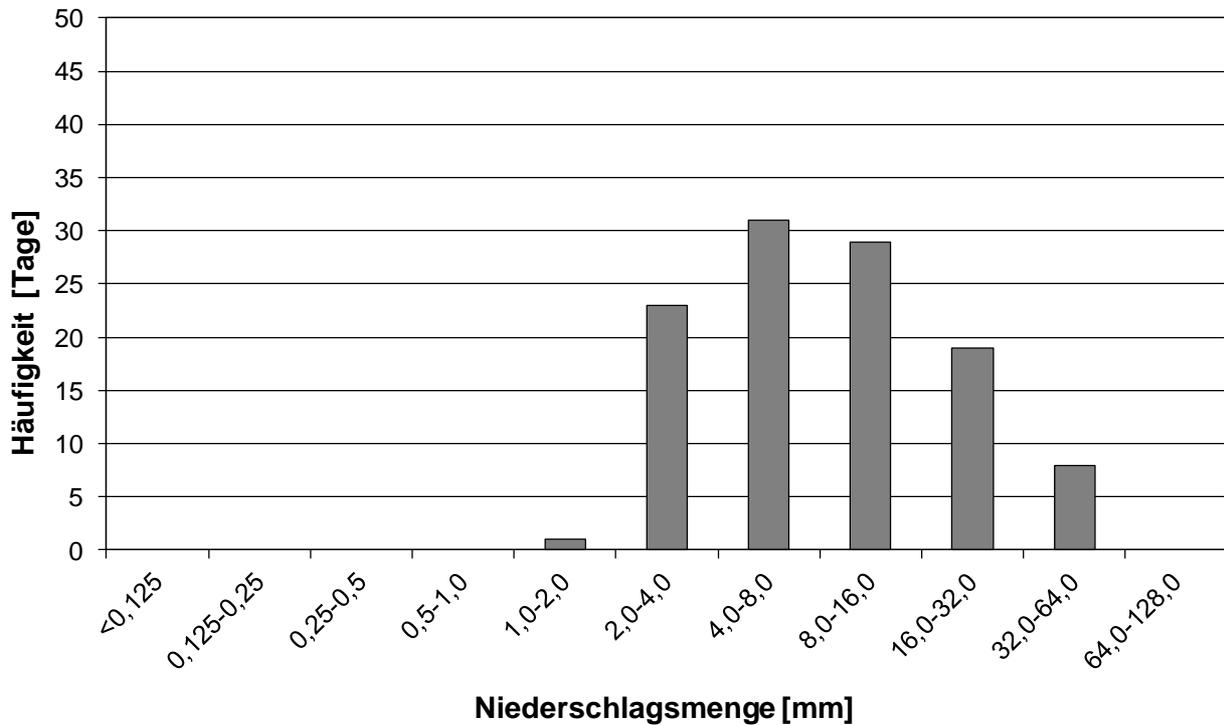
Die Auswertung der Tagesproben zeigt eine hohe Variabilität der täglichen Niederschlagsmengen, der Konzentrationswerte und entsprechend auch der täglichen Depositionsmengen. Daher wurden Häufigkeitsverteilungen und zusätzliche Parameter zur Beschreibung der Messwertverteilungen erstellt. Aufgrund der Häufigkeitsverteilung der täglichen Niederschlagsmengen wurden logarithmisch skalierte Niederschlagsklassen verwendet.

Zur Beschreibung der asymmetrischen Verteilungen der Messwerte eignen sich Perzentilwerte und davon abgeleitete Parameter als Lokalisations- und Dispersionsmaßzahlen. Eine kurze Erläuterung zu diesen Maßzahlen und die dazugehörigen Auswertungen befindet sich im Anhang (Tabellen A 28 bis A 31).

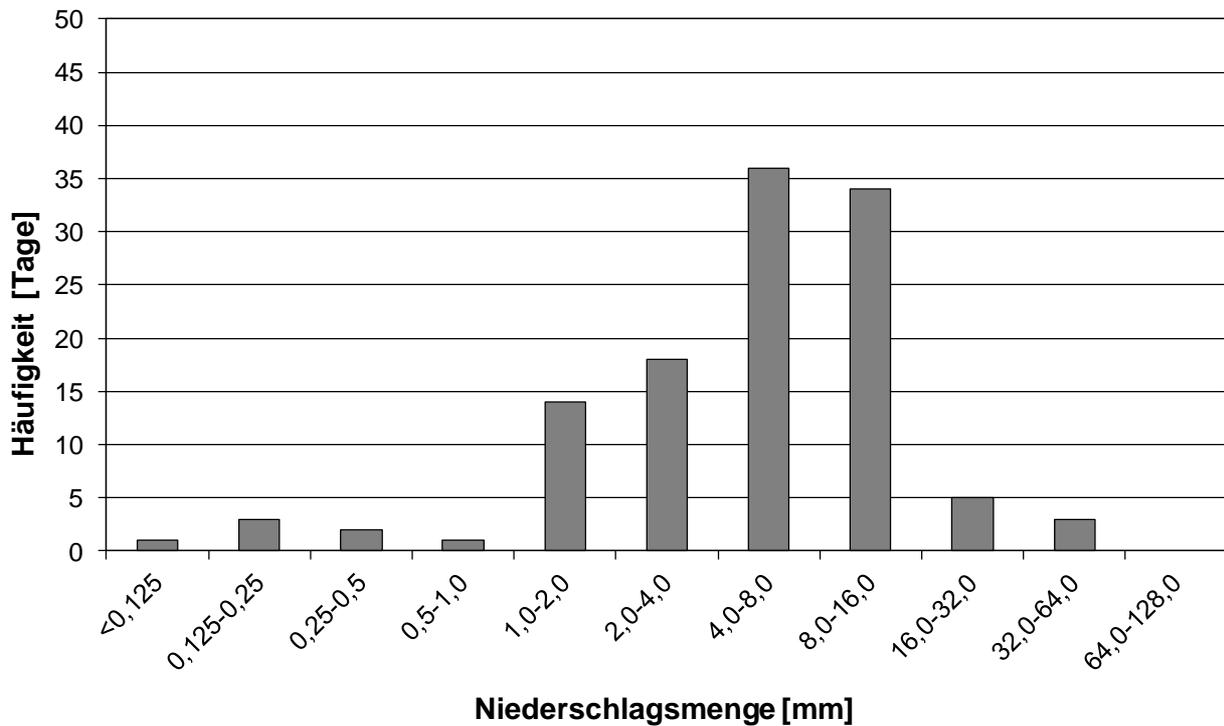
Die Häufigkeiten der täglichen **Niederschlagsmengen** sind in den Abbildungen 34 bis 36 dargestellt. Erkennbar ist, dass Tage mit sehr niedrigen bzw. sehr hohen Niederschlagsmengen selten auftreten. Die Tabellen 14 bis 16 listen die in den Abbildungen gezeigten absoluten Häufigkeiten sowie die relativen Häufigkeiten der Niederschlagsklassen und Niederschlagsmengen auf. Regentage mit mehr als 16 mm Niederschlag sind an den Messstellen in Nordtirol von großer Bedeutung. So fielen in Höfen an 23 Tagen (nur 16 % aller Regentage) ca. 49% des Jahresniederschlags und in Niederndorferberg an 27 Tagen (24 % aller Regentage) knapp 55 % des Jahresniederschlags. Innervillgraten hatte in der Untersuchungsperiode nur 8 Tage mit mehr als 16 mm, welche nur 26% des Jahresniederschlags ausmachten. An 34 Regentagen (29% aller Regentage) mit einer Regenmenge zwischen 8 und 16 mm wurde knapp 43% des Jahresniederschlags in Innervillgraten erreicht (vergleiche Tabellen 14 - 16).



**Abbildung 34:** Anzahl der Regentage in den jeweiligen Niederschlagsklassen an der Messstelle **Höfen**.



**Abbildung 35:** Anzahl der Regentage in den jeweiligen Niederschlagsklassen an der Messstelle Niederndorferberg.



**Abbildung 36:** Anzahl der Regentage in den jeweiligen Niederschlagsklassen an der Messstelle Innervillgraten.

**Tabelle 14:** Absolute und relative Häufigkeit sowie Niederschlagsmenge in den Niederschlagsklassen für den Zeitraum 01.10.2015 bis 30.09.2016 an den Messstellen.

Niederschlagsklasse [mm]			Häufigkeit		Niederschlagsmenge	
			N	[%]	[mm]	[%]
<b>Höfen</b>						
	bis	0,125	-	-	-	-
0,125	-	0,25	4	2,8	6,8	0,6
0,25	-	0,5	6	4,2	2,3	0,2
0,5	-	1	12	8,5	9,2	0,8
1	-	2	12	8,5	16,9	1,5
2	-	4	19	13,4	52,4	4,6
4	-	8	41	28,9	239,4	20,9
8	-	16	25	17,6	261,2	22,8
16	-	32	20	14,1	435,2	38,1
32	-	64	3	2,1	120,0	10,5
64	-	128	-	-	-	-
<b>Innervillgraten</b>						
	bis	0,125	1	0,9	0,1	0,0
0,125	-	0,25	3	2,6	0,4	0,0
0,25	-	0,5	2	1,7	0,9	0,1
0,5	-	1	1	0,9	0,9	0,1
1	-	2	14	12,0	19,5	2,2
2	-	4	18	15,4	52,3	5,8
4	-	8	36	30,8	206,5	23,0
8	-	16	34	29,1	383,9	42,7
16	-	32	5	4,3	106,9	11,9
32	-	64	3	2,6	126,8	14,1
64	-	128	-	-	-	-
<b>Niederndorferberg</b>						
	bis	0,125	-	-	-	-
0,125	-	0,25	-	-	-	-
0,25	-	0,5	-	-	-	-
0,5	-	1	-	-	-	-
1	-	2	1	0,9	2,0	0,1
2	-	4	23	20,7	67,1	5,1
4	-	8	31	27,9	170,2	12,9
8	-	16	29	26,1	362,0	27,4
16	-	32	19	17,1	428,8	32,4
32	-	64	8	7,2	293,5	22,2
64	-	128	-	-	-	-

Mit zunehmender Niederschlagsmenge nehmen die Ionenkonzentrationen im Mittel ab. Während die Konzentrationswerte der Niederschlagsproben mit geringen Niederschlagsmengen stark streuen, weisen die Tagesproben mit hohen Niederschlagsmengen generell geringe Ionenkonzentrationen auf. Diese Beobachtung kann auf das „Auswaschen“ der Stoffe aus der Atmosphäre zurückgeführt werden. In den Tabellen 17 bis 19 sind die volumengewichteten Mittelwerte der Ionenkonzentrationen und die pH-Werte je Niederschlagsklasse angegeben. Da bei geringen Niederschlagsmengen teilweise nicht alle Analysen durchgeführt werden können, fehlen in den folgenden Tabellen einzelne Ergebnisse.

**Tabelle 15:** Mittlerer pH Wert und mengengewichtete Konzentrationen in den Niederschlagsklassen für den Zeitraum 01.10.2015 bis 30.09.2016 an den Messstellen.

Niederschlagsklasse	pH	H <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N	K <sup>+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Cl <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> -S
[mm]	[-]					[mg/L]				
<b>Höfen</b>										
bis 0,125	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
0,125 - 0,25	-	-	-	-	-	-	-	0,26	0,36	0,13
0,25 - 0,5	-	-	-	0,49	-	-	-	0,99	1,01	0,84
0,5 - 1	5,7	0,002	0,73	0,64	0,18	0,93	0,47	0,61	0,73	0,33
1 - 2	6,3	0,001	0,15	0,47	0,19	0,41	0,13	0,16	0,38	0,15
2 - 4	6,1	0,001	0,25	0,49	0,07	1,03	0,21	0,34	0,49	0,25
4 - 8	5,9	0,001	0,12	0,39	0,06	0,69	0,17	0,19	0,35	0,23
8 - 16	6,0	0,001	0,06	0,32	0,05	0,34	0,10	0,09	0,24	-
16 - 32	5,9	0,001	0,04	0,22	0,04	0,22	0,05	0,11	0,13	0,08
32 - 64	5,8	0,002	0,03	0,11	0,03	0,10	0,02	0,05	0,07	0,03
64 - 128	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>Niederndorferberg</b>										
bis 0,125	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
0,125 - 0,25	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
0,25 - 0,5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
0,5 - 1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1 - 2	6,8	0,000	0,32	0,72	0,10	2,15	0,18	0,54	0,68	0,54
2 - 4	5,2	0,007	0,16	0,80	0,06	0,28	0,05	0,21	0,63	0,22
4 - 8	5,1	0,007	0,23	0,67	0,08	0,23	0,04	0,32	0,57	0,22
8 - 16	5,3	0,005	0,11	0,44	0,04	0,17	0,02	0,15	0,38	0,15
16 - 32	5,6	0,002	0,05	0,32	0,07	0,09	0,01	0,07	0,21	0,10
32 - 64	5,6	0,003	0,03	0,27	0,04	0,06	0,01	0,06	0,17	0,09
64 - 128	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>Innervillgraten</b>										
bis 0,125	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
0,125 - 0,25	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
0,25 - 0,5	-	-	-	-	-	-	-	0,17	0,16	0,08
0,5 - 1	-	-	-	1,63	-	-	-	0,45	0,25	0,18
1 - 2	6,2	0,001	0,10	0,43	0,17	0,24	0,09	0,22	0,19	0,17
2 - 4	6,1	0,001	0,05	0,57	0,31	0,19	0,06	0,13	0,23	0,11
4 - 8	6,1	0,001	0,11	0,79	0,21	0,44	0,06	0,21	0,20	0,18
8 - 16	5,7	0,002	0,06	0,41	0,09	0,21	0,03	0,11	0,17	0,14
16 - 32	6,0	0,001	0,08	0,57	0,04	0,16	0,02	0,13	0,18	0,13
32 - 64	5,8	0,002	0,04	0,21	0,04	0,09	0,02	0,05	0,12	0,10
64 - 128	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Tage mit geringen Niederschlägen liefern relativ wenig Stoffeintrag. Die seltenen, aber ergiebigen Niederschläge (16 bis 128 mm pro Tag) verursachten dagegen beachtliche Stoffeinträge, wie in den Tabellen 20 bis 22 zu erkennen ist. Ergänzend zu den absoluten Stoffeinträgen werden in den Tabellen 23 bis 25 auch die relativen Beiträge, aufgeteilt auf die einzelnen Niederschlagsklassen, angegeben.

Als Beispiel für die Bedeutung von Starkregenereignissen sei an dieser Stelle die Station Niederndorferberg angeführt. In der Untersuchungsperiode 2015/16 führten 84 Regentage mit Niederschlagsmengen bis 16 mm (das sind 76% aller Niederschlagstage) zu etwa 61% des gesamten Sulfatschwefeleintrages, während nur 27 Tage mit 16 bis 128 mm Niederschlag (24% aller Niederschlagstage) die restlichen 39% des gesamten Sulfatschwefeleintrages bewirkten.

**Tabelle 16:** Nasse Deposition je Niederschlagsklasse für den Zeitraum 01.10.2015 bis 30.09.2016 an den Messstellen.

Niederschlagsklasse	pH	H <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N	K <sup>+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Cl <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> -S
[mm]	[-]					[kg/ha]				
<b>Höfen</b>										
bis 0,125	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
0,125 - 0,25	-	-	-	-	-	-	-	0,02	0,02	0,01
0,25 - 0,5	-	-	-	0,01	-	-	-	0,02	0,02	0,02
0,5 - 1	5,7	0,00	0,07	0,06	0,02	0,09	0,04	0,06	0,07	0,03
1 - 2	6,3	0,00	0,03	0,08	0,03	0,07	0,02	0,03	0,06	0,03
2 - 4	6,1	0,00	0,13	0,26	0,03	0,54	0,11	0,18	0,26	0,13
4 - 8	5,9	0,00	0,28	0,92	0,14	1,65	0,41	0,46	0,84	0,55
8 - 16	6,0	0,00	0,17	0,84	0,12	0,90	0,25	0,23	0,64	-
16 - 32	5,9	0,01	0,17	0,97	0,15	0,96	0,23	0,48	0,57	0,36
32 - 64	5,8	0,00	0,03	0,13	0,03	0,12	0,03	0,06	0,08	0,04
64 - 128	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>Niederndorferberg</b>										
bis 0,125	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
0,125 - 0,25	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
0,25 - 0,5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
0,5 - 1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1 - 2	6,8	0,00	0,01	0,01	0,00	0,04	0,00	0,01	0,01	0,01
2 - 4	5,2	0,00	0,11	0,54	0,04	0,18	0,03	0,14	0,43	0,15
4 - 8	5,1	0,01	0,39	1,14	0,14	0,39	0,07	0,55	0,97	0,37
8 - 16	5,3	0,02	0,39	1,59	0,13	0,61	0,09	0,56	1,36	0,55
16 - 32	5,6	0,01	0,20	1,38	0,30	0,39	0,06	0,31	0,91	0,44
32 - 64	5,6	0,01	0,09	0,79	0,12	0,17	0,03	0,17	0,51	0,25
64 - 128	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>Innervillgraten</b>										
bis 0,125	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
0,125 - 0,25	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
0,25 - 0,5	-	-	-	-	-	-	-	0,00	0,00	0,00
0,5 - 1	-	-	-	0,01	-	-	-	0,00	0,00	0,00
1 - 2	6,2	0,00	0,02	0,08	0,03	0,05	0,02	0,04	0,04	0,03
2 - 4	6,1	0,00	0,03	0,30	0,16	0,10	0,03	0,07	0,12	0,06
4 - 8	6,1	0,00	0,23	1,64	0,44	0,90	0,13	0,43	0,42	0,37
8 - 16	5,7	0,01	0,22	1,57	0,36	0,81	0,13	0,41	0,66	0,54
16 - 32	6,0	0,00	0,09	0,61	0,04	0,17	0,03	0,14	0,20	0,14
32 - 64	5,8	0,00	0,06	0,27	0,05	0,12	0,02	0,06	0,15	0,13
64 - 128	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

**Tabelle 17:** Verteilung der Regeninhaltsstoffe je Niederschlagsklasse für den Zeitraum 01.10.2015 bis 30.09.2016 an den Messstellen.

Niederschlagsklasse [mm]	H <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N	K <sup>+</sup>	Ca <sup>2+</sup> [%]	Mg <sup>2</sup>	Cl <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> -S
<b>Höfen</b>									
bis 0,125									
0,125 - 0,25							1,2	1,0	0,8
0,25 - 0,5			0,4				1,5	0,9	1,7
0,5 - 1	1,5	7,8	1,8	3,1	2,0	3,9	3,7	2,6	2,6
1 - 2	0,6	3,0	2,4	5,9	1,6	2,0	1,8	2,5	2,2
2 - 4	3,2	15,3	7,9	6,6	12,5	10,0	11,5	10,0	11,2
4 - 8	22,3	32,1	28,3	27,2	38,1	37,1	29,8	32,9	47,5
8 - 16	18,1	19,3	25,8	22,5	20,8	23,0	15,3	24,8	0,0
16 - 32	38,5	19,1	29,6	29,1	22,2	21,3	31,4	22,2	31,0
32 - 64	15,9	3,5	3,9	5,7	2,7	2,6	3,9	3,1	3,1
64 - 128									
<b>Niederndorferberg</b>									
bis 0,125									
0,125 - 0,25									
0,25 - 0,5									
0,5 - 1									
1 - 2	0,0	0,5	0,3	0,3	2,4	1,3	0,6	0,3	0,6
2 - 4	8,5	8,9	9,8	5,9	10,4	10,9	8,2	10,2	8,2
4 - 8	23,6	32,9	20,9	19,2	22,0	24,5	31,6	23,1	20,9
8 - 16	32,3	33,0	29,2	17,7	34,2	31,3	32,3	32,5	31,2
16 - 32	19,8	16,9	25,2	40,5	21,8	21,7	17,7	21,9	24,8
32 - 64	15,8	7,8	14,6	16,5	9,3	10,2	9,7	12,1	14,3
64 - 128									
<b>Innevillgraten</b>									
bis 0,125									
0,125 - 0,25									
0,25 - 0,5							0,1	0,1	0,1
0,5 - 1			0,3				0,3	0,1	0,1
1 - 2	0,9	3,0	1,9	3,1	2,2	4,7	3,7	2,3	2,6
2 - 4	3,6	4,2	6,7	14,9	4,6	8,9	5,7	7,5	4,3
4 - 8	11,7	36,6	36,7	40,4	42,1	36,2	37,4	26,7	29,2
8 - 16	57,2	34,0	35,0	33,2	37,7	36,4	35,2	41,6	42,5
16 - 32	9,2	13,6	13,6	3,8	7,8	7,2	12,0	12,4	11,0
32 - 64	17,4	8,7	5,9	4,6	5,6	6,5	5,5	9,3	10,2
64 - 128									

#### 4. Schlussfolgerungen

- In der vorliegenden Untersuchungsperiode setzten sich die Trends der letzten Jahre an den drei Tiroler Messstellen fort. Es konnte eine leichte Abnahme der Konzentrationswerte für Schwefel und Nitrat-Stickstoff in den Niederschlagswässern festgestellt werden.
- Seit Beginn der Messungen nahm der jährliche Eintrag von Sulfat-Schwefel durch nasse Deposition um 3,1 kg/ha (Innervillgraten), 5,7 kg/ha (Höfen) und 6,8 kg/ha (Niederndorferberg) ab. Auch der jährliche Eintrag an Gesamtstickstoff war an zwei Stationen rückläufig. In Niederndorferberg lag diese Abnahme über den gesamten Untersuchungszeitraum bei 4,0 kg/ha und in Höfen bei 4,8 kg/ha. Innervillgraten hingegen zeigt, bedingt durch einen hohen Beitrag an Ammonium-Stickstoff, eine Zunahme des Gesamtstickstoffeintrags, die im langjährigen Trend allerdings nicht signifikant ist. Grund dafür scheint eine zunehmende Intensivierung der landwirtschaftlichen Nutzung der Umgebung der Messstelle zu sein.
- Der jährliche Schwefeleintrag liegt weiterhin deutlich unter dem Grenzwert (3 kg/ha/Jahr) der WHO (1995), während der Eintrag an Stickstoff teilweise knapp den Grenzwert (10 kg/ha/Jahr) für sensible Ökosysteme gemäß dem Konzept der Critical Loads erreicht. Eine weitere Beobachtung der Stickstoffeinträge ist daher wichtig, da neben der nassen Deposition auch die trockene Deposition und direkte Einträge über den Nebel nährstoffarme Ökosysteme beeinträchtigen.
- Im Jahresverlauf werden in den wärmeren Monaten bis zu 4 Mal höhere Ioneneinträge durch die Niederschlagswässer gemessen als in den Wintermonaten.
- Die Konzentrationswerte der Ionen im Niederschlag nehmen zwar mit zunehmender Regenmenge ab, jedoch tragen Tage mit großen Regenmengen (>16 mm) überdurchschnittlich zu den Stoffeinträgen bei.

#### Danksagung

Die Autoren bedanken sich herzlich bei Josef Bergmann (Innervillgraten), Richard Schwaighofer (Niederndorferberg) und Gertraud Scheiber (Höfen) für die tägliche Betreuung der WADOS-Messstellen und die zuverlässige Zusammenarbeit. Weiters gilt Dank Martin Perlornigg, Werner Nocker und Dionys Schatzer (alle Abt. Waldschutz) für die Unterstützung bei den WADOS Messungen und Manfred Recheis (Sg. Chemisch-technische Umweltschutzanstalt) für die Abwicklung der Probenanalysen.

## 5. Literatur

Bundesministerium für Gesundheit und Umweltschutz (1984) Richtlinie 11, Immissionsmessung des nassen Niederschlags und des sedimentierten Staubes, Luftverunreinigung - Immissionsmessung, Wien.

Cehak K., Chalupa K. (1985) Observations of various chemical contaminants of the precipitation at a BAPMoN station in the Eastern Pre-Alpine Region, Arch. Met. Geophys. Bioclimat. B35, 307-322.

Granat L. (1978) Sulfate in precipitation as observed by the European Atmospheric Chemistry Network, Atmospheric Environment 12, 413-424.

GEOLOGISCHE BUNDESANSTALT (2006): Provisorische Geologische Karte der Republik Österreich 1: 25.000, 178 Hopfgarten in Deferegggen

GEOLOGISCHE BUNDESANSTALT (2007): Provisorische Geologische Karte der Republik Österreich 1: 25.000, 90 Kufstein.

Hand J. L., Schichtel B. A., Malm W. C., and Pitchford M. L. (2012) Particulate sulfate ion concentration and SO<sub>2</sub> emission trends in the United States from the early 1990s through 2010. Atmospheric Chemistry and Physics 12, 10353-10365.

Hedin L.O., Granat L., Likens G.E., Rodhe H. (1991) Strong similarities in seasonal concentration ratios of SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup> and NH<sub>4</sub><sup>+</sup> in precipitation between Sweden and northeast US, Tellus 43B, 454-462.

Herman F., Knoflacher M., Loibl W., Kalina M. and Smidt S. (1998) Risk assessment by nitrogen input in the European Alps, in Responses of plant metabolism to air pollution and global change, ed. by L.J. De Kok and I. Stulen, Backhuys Publishers, Leiden, The Netherlands, 329-332.

Horvath L., Meszaros E. (1984) The composition and acidity of precipitation in Hungary, Atmospheric Environment 18, 1843-1847.

Kalina M.F., Puxbaum H. (1994) A study of the influence of riming of ice crystals on snow chemistry during different seasons in precipitation continental clouds, Atmospheric Environment Vol.28., 20, 3311-3328.

Kalina M. F., Puxbaum H. (1995) Verteilung der nassen Deposition von Schwefel- und Stickstoffverbindungen in Österreich, Dokumentation der Daten für 1991, Bericht 9/94, Institut für Analytische Chemie, TU-Wien, Österreich.

Kalina M. F., Puxbaum H. (1995) Verteilung der nassen Deposition von Niederschlagsinhaltsstoffen in Österreich, Dokumentation der Daten für 1992, Bericht 3/95, Institut für Analytische Chemie, TU-Wien, Österreich.

Kalina M., Puxbaum H., Tsakovski S. and Simeonov V. (1999) Time trends in the concentrations of lead in wet precipitation from rural and urban sites in Austria, Chemosphere 38, 11, 2509-2515.

Kalina M. F., Schatten A., Puxbaum H., Biebl P. (1995) "Saurer Regen", Nasse Deposition im Land Salzburg, Oktober 1983 bis September 1994, Ergebnisse der elfjährigen Meßserie, Bericht 4/95, Institut für Analytische Chemie, TU-Wien, Österreich.

Kalina M., S. Stopper, E. Zambo, H. Puxbaum (2002) Altitude-dependent wet, dry and occult nitrogen deposition in an Alpine region (Achenkirch, Austria, 920 m - 1758 m a.s.l.). Environmental Science & Pollution Research 2, 16-22.

Kalina M. F., Zambo E. and Puxbaum H. (1998) Assessment of wet, dry and occult deposition of sulfur and nitrogen at an alpine site, Environmental Science & Pollution Research 1, 53-58.

Kasper A., Puxbaum H. (1994) Determination of SO<sub>2</sub>, HNO<sub>3</sub>, NH<sub>3</sub> and aerosol components at an high alpine background site with a filter pack method, Analitica Chimica Acta 291, 297-304.

Kovar A., Puxbaum H. (1990) A simple model to explain spring maximum of sulfate concentration in precipitation water, Int. Conference on Acidic Deposition, Glasgow, 1990.

Meszaros E. (1974) On the spring maximum of the concentration of trace constituents in atmospheric precipitation, Tellus 24, 402-407.

Miles L.J., Yost K.J. (1982) Quality analysis of USGS precipitation chemistry data for New York, Atmospheric Environment 16, 2889-2898.

Nagel H. D. und Gregor H. D. (1999) Ökologische Belastungsgrenzen – Critical Loads & Levels, Verlag Springer, ISBN 3-540-62418-X

- Puxbaum H. and Gregori Kalina M. (1998) *Seasonal and Annual Deposition Rates of Sulfur, Nitrogen and Chloride Species to an Oak Forest in North-Eastern Austria (Wolkersdorf, 240 m a.s.l.)*, *Atmospheric Environment* 32, 3557-3568.
- Puxbaum H., Kovar A., Kalina M. (1991) *Chemical Composition and Fluxes of Wet Deposition at Elevated Sites (700-3105 m a.s.l.) in the Eastern Alps (Austria)*, NATO ASI Series, Vol.G28, *Seasonal Snowpacks*, ed. by T.D.Davies et al., Verlag Springer Berlin Heidelberg, 273-297.
- Puxbaum H., Simeonov V., Kalina M. (1998) *Ten years trends (1984-1993) in the precipitation chemistry in Central Austria*, *Atmospheric Environment* 32, 193-202.
- Puxbaum H., Simeonov V., Kalina M., Tsakovski S., Löffler H., Heimbürger G., Biebl P., Weber A., Damm A. (2002) *Long-Term assessment of the wet precipitation chemistry in Austria (1984-1999)*, *Chemosphere* 48,733-747.
- Rhode H., Granat L. (1984) *An evaluation of sulfate in European precipitation 1955-1982*, *Atmospheric Environment* 18, 2627-2639.
- RÖHRING, M. (1997): *Über geologische Aufnahmen in den Nördlichen Kalkalpen (Lechtaler Alpen) auf Blatt 115 Reutte Bericht 1997*. [http://www.geologie.ac.at/filestore/download/JB1413\\_276\\_A.pdf](http://www.geologie.ac.at/filestore/download/JB1413_276_A.pdf)
- Schreiner E., Kasper-Giebl A. and Lohninger H. (2016) *Temporal and spatial trends of chemical composition of wet deposition samples collected in Austria*. EGU General Assembly 2016, Vol. 18, EGU2016-15374
- Simeonov V., Puxbaum H., Tsakovski S., Sarbu C. and Kalina M. (1999) *Classification and receptor modeling of wet precipitation data from Central Austria*, *Environmetrics* 10, 137-152.
- Smith F.B. and Hunt R.D. (1978) *Meteorological aspects of the transport of pollution over long distances*, *Atmospheric Environment* 12, 1921-1932.
- TIROL ATLAS, 2017. *Geographie Innsbruck*. <http://tirolatlas.uibk.ac.at/graphics/lieth/index.html.de>
- Torseth K, Aas W., Breivik K., Fjerss A.M., Fiebig M., Hjellbrekke A.G., Lund Myhre C., Solberg S., Yttri K.E. (2012) *Introduction to the European Monitoring and Evaluation Programme (EMEP) and observed atmospheric composition change during 1972-2009*. *Atmospheric Chemistry and Physics* 12, 5447-5481.
- Tsakovski S., Puxbaum H., Simeonov V., Kalina M., Löffler H., Heimbürger G., Biebl P., Weber A., Damm A. (2000) *Trend, seasonal and multivariate modelling study of wet precipitation data from the Austrian Monitoring Network (1990-1997)*, *Journal of Environmental Monitoring* 2, 424-431.
- Vet R. et al. 21 authors (2014) *A global assessment of precipitation chemistry and deposition of sulphur, nitrogen, sea salt, base cations, organic acids, acidity und pH, and phosphorus*. *Atmospheric Environment* 93, 3-100.
- Walter H. & Lieth H. 1960. *Klimadiagramm-Weltatlas*. Jena, VEB G. Fischer.
- WHO (1995) *Updating and revision of the air quality guidelines for Europe*. Rept. on the WHO Working Group on Ecotoxic Effects, Les Diablerets, Sept 21-23, 1994.
- WORLD Meteorological ORGANISATION GLOBAL ATMOSPHERE WATCH. (2004) *Manual for the GAW precipitation chemistry programme No. 160, WMO TD No. 1251* ([http://library.wmo.int/pmb\\_ged/wmo-td\\_1251.pdf](http://library.wmo.int/pmb_ged/wmo-td_1251.pdf)).